INVESTIGACION y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

REPRESENTACION VISUAL DE LAS OPERACIONES MENTALES

MISION PIONEER A VENUS

CANCER DE PROSTATA



MASCARA PREINCAICA

JUNIO 1994
700 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa



Junio de 1994 Número 213



Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Ramón Pascual: *Ondas de densidad de carga y de espín*; J. P. Campos: *Química y física de la cocina*; Esteban Santiago: *Cáncer de próstata*; Irene y Pere Molera: *Objetos de metales preciosos del Sicán medio*; Mónica Murphy: *Misión* Pioneer *a Venus*; J. P. Adrados: *Películas superconductoras*; J. Vilardell: *Hace..., Taller y laboratorio*; A. Garcimartín: *Perfiles*; Shigeko Suzuki: *De cerca*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*; J. M. García de la Mora: *Ensayo*.

Ciencia y sociedad:

Oriol Pascual

Ciencia y empresa:

Ana M.ª Rubio

Portada: Yutaka Yoshii

Página	Fuente
7-9	Luis S. Mayorga, M.ª Isabel Colombo y Pere Lluís León
10-11	Luis S. Mayorga y M.ª Isabel Colombo
12	Luis S. Mayorga, M.ª Isabel Colombo y Pere Lluís León
15	Robert V. Coleman y C. Gray Slough, Universidad de Virginia
16-19	Jared Schneidman/Jared Schneidman Design
20	Jared Schneidman/JSD (*arriba*), Comstock, Inc./Georg Gerster (*abajo*)
22-23	Jonathan D. Cohen, Universidad Carnegie Mellon
24-26	Marcus E. Raichle
27	Guilbert Gates
28	Rodolfo R. Llinás, Hospital Clínico de la Universidad de Nueva York
40-41	Steve Murez/Black Star
42	Andrew Paul Leonard/APL Microscopic (*izquierda*), Dana Bums-Pizer (*derecha*)
43	Dana Bums-Pizer
44	Paulette y André Lacour, INRI
45	Steve Murez/BLack Star
47	Michael Grecco/Sygma
48	Tomo Narashima
49	Johnny Johnson
50	Dimitry Schidlovsky
51	Johnny Johnson
52-53	Dimitry Schidlovsky
55	Yutaka Yoshii (*fotografía*)
56	Izumi Shimada (*izquierda, arriba a la derecha y abajo a la derecha*), Yutaka Yoshii (*centro a la derecha*)
57	Izumi Shimada
58	Yutaka Yoshii (*arriba*), Jo Ann Griffin (*abajo*)
59	César Samillán (*dibujo*), Jo Ann Griffin (*arriba a la derecha y abajo*), Yutaka Yoshii (*centro*)
60	Yutaka Yoshii (*arriba*), Izumi Shimada (*abajo*)
61	Yutaka Yoshii
63	George Retseck
64	NASA (*arriba*), Tomo Narashima (*abajo*)
65	NASA (*izquierda*), Jared Schneidman/JSD (*derecha*).
66	Tomo Narashima
67	A.I.F. Stewart, Universidad de Colorado
68-69	Tomo Narashima
71	J. F. Amet y P. Berustein, CRISMAT de Caen, F. R. Ladan, L2M en Bagneux
72-77	Documents Pour la Science
83-85	Kathy Konkle
86-91	Documents Pour la Science



La fotografía de la portada muestra un conjunto sicano, recientemente restaurado, de máscara y tocado. Debido al extenso saqueo de las tumbas del Sicán ningún otro conjunto de este tipo se había librado de la fundición. La cultura sicana, preincaica, floreció en el norte del Perú desde el 700 hasta 1300 d.C. De sus talleres salieron numerosísimos objetos de oro, la mayoría de los cuales ilustra el notable grado de desarrollo técnico y estético alcanzado (*véase* "Objetos de metales preciosos del Sicán medio", en este mismo número).

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; John Rennie, *Associate Editors*; Timothy M. Beardsley; W. Wayt Gibbs; Marguerite Holloway; John Horgan, *Senior Writer*; Kristin Leutwyler; Philip Morrison, *Book Editor*; Madhusree Mukerjee; Corey S. Powell; Ricki L. Rusting; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CO-CHAIRMAN Dr. Pierre Gerckens
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	7.700	14.000
Extranjero	8.600	15.800

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 700 pesetas
Extraordinario: 900 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13

Difusión controlada

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 - 08907 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

....cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «La televisión ofrece la base más sólida para la paz mundial que hasta ahora se haya presentado. La paz debe crearse sobre un bastión de buen entendimiento. La televisión internacional puede tejer lazos de respeto mutuo entre los pueblos; sus posibilidades son, a no dudar, inmensas.—*Norman D. Waters, de la Sociedad Americana de Televisión.*»

«Las estadísticas muestran que, pese a lo mucho que se ha hecho para reducir los accidentes laborales, queda bastante camino por recorrer. Desde Pearl Harbor hasta el primero de enero de 1944, murieron como bajas de guerra 32.078 soldados, marineros e infantes de marina, mientras que 94.000 trabajadores perecieron en accidentes. El número de heridos laborales empequeñece largamente al número de heridos de guerra: hasta el primero de enero de 1944 entre nuestras fuerzas armadas se registraban 45.595 heridos y 8.800.000 lesiones en nuestra fuerza laboral.»

«Uno de los mayores enemigos de la seguridad en vuelo, la formación de hielo en las hélices, se está venciendo merced a un "forro" eléctricamente caldeado que cubre la superficie de las hélices y las calienta a la manera de las almohadillas hospitalarias. El forro está formado por dos clases de caucho sintético, con la superficie externa constituida por un revestimiento delgado especialmente preparado para que conduzca la electricidad.»

...cien años

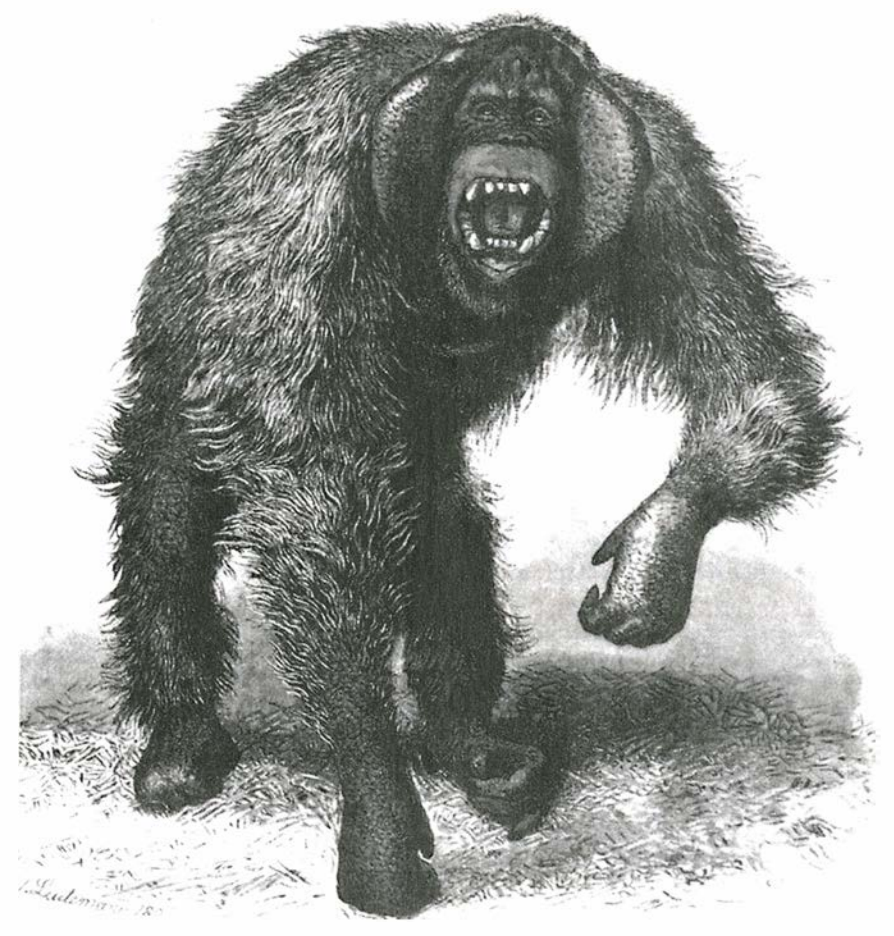
SCIENTIFIC AMERICAN: «La tendencia en nuestros días es que el caballo debe desaparecer, debe desaparecer metafóricamente, pues sus días de labor parecen algo casi del pasado.»

«S. E. Christian propone, en *Popular Astronomy*, la teoría de que el centelleo estelar lo causan fundamentalmente los pequeños cuerpos meteóricos que, en números inconcebibles, pasan incesantemente entre nuestro planeta y las estrellas. Esos cuerpos podrían provocar la oscilación momentánea de las estrellas si su número fuese lo bastante elevado, y las últimas investigaciones parecen señalar que lo es.»

«Afirma Mr. Francis Galton que "las formas de los caballetes papilares de las superficies palmares bulbosas de las falanges terminales de dedos y pulgares permanecen absolutamente inalteradas durante toda la vida y muestran, entre individuos diferentes, una infinita variedad de conformaciones y peculiaridades. La probabilidad de que dos huellas dactilares sean iguales es menor que uno entre sesenta y cuatro mil millones. Por consiguiente, si se comparan dos huellas y resultan coincidir exactamente, podemos estar prácticamente seguros de que pertenecen al mismo dedo de la misma persona; si difieren, son de dedos diferentes".—*Lancet.*»

«*Medical Record* cuenta el caso de una mujer de Ohio que aprovechó la fuerte fiebre de su marido, tísico, durante las ocho semanas anteriores a su muerte, utilizándolo como incubador de huevos de gallina. Para ello tomaba 50 huevos, los envolvía en guata uno a uno y luego los disponía junto al cuerpo de su marido, yacente e incapaz de oponerse ni mover un dedo. Al cabo de tres semanas recogía una cosecha de cuarenta y seis pollitos.»

«Publicamos hoy un grabado (una gentileza de *Illustrierte Zeitung* que agradecemos) del gigantesco orangután del Parque Zoológico de Leipzig. Este ejemplar y otros dos que murieron de frío el último invierno son los únicos orangutanes adultos que hasta ahora llegaron vivos a Europa. El animal no tiene la estatura que cabría suponer en un primer vistazo ya que apenas rebasa el metro veinte. El simio ha perdido uno de sus colmillos superiores. Numerosas cicatrices en sus manos y pies revelan que su vida pasada fue agitada y que sufrió honrosas heridas. Tiene el pulgar izquierdo torcido y uno de los pies lisiado. En cautividad se alimenta de arroz en remojo, leche, huevos crudos, naranjas y dátiles; le gustan mucho los plátanos y el pan blanco.»



El nuevo orangután del Jardín Zoológico de Leipzig

Transporte entre compartimientos intracelulares

Las macromoléculas son transportadas entre los distintos compartimientos membranosos de la célula por mecanismos que involucran numerosas proteínas reguladas por GTP

Luis S. Mayorga y María Isabel Colombo

Las células eucariotas poseen un conjunto de compartimientos que están delimitados por membranas. La vida de la célula sería impensable sin el funcionamiento correcto y en armónica relación mutua de esos orgánulos. Para cumplir esa misión, cada compartimiento tiene proteínas de membrana y solubles que le son características. Pensemos, por ejemplo, en los lisosomas, orgánulos que se encargan de la digestión de las moléculas y las partículas que han entrado en la célula a través de un proceso de endocitosis o invaginación; disponen, a tal efecto, de una batería de enzimas hidrolíticas y una serie de glicoproteínas específicas que protegen a su membrana de ser digerida por sus propias enzimas.

Los compartimientos interactúan entre sí e intercambian membranas y contenido. Es necesario, pues, que la célula mantenga la existencia de estructuras membranosas bastante estables sin cerrar el tráfico de macromoléculas entre las mismas. Se han propuesto tres modelos para explicar este flujo de material de unos orgánulos a otros: transporte vesicular, transporte tubular y transporte por maduración.

En el modelo del transporte vesicular, las moléculas transitan de un compartimiento a otro incorporadas en vesículas que se forman en el compartimiento de origen y se fusionan con el compartimiento de destino. De acuerdo con el modelo del transporte tubular, las moléculas se difunden de un compartimiento a otro a través de las conexiones tubulares que se establecen al fusionarse las membranas de ambos. En el modelo de maduración, los compartimientos se van transformando con el tiempo, y así una macromolécula puede aparecer en diferentes estructuras sin tener que ser trasvasada.

Se han identificado dos tipos de vesículas de transporte, que se caracterizan por el complejo proteico que las recubre. Las revestidas de clatrina —proteína mayoritaria del recubrimiento— se generan en la membrana plasmática y en el último repliegue del aparato de Golgi. Las vesículas carentes de clatrina en su cubierta intervienen en el acarreo de proteínas desde el retículo endoplasmático hacia el aparato de Golgi y entre las distintas cisternas de este último.

Resulta verosímil que participen los tres modelos, de una forma u otra, en las dos vías principales de transporte intracelular: la exocitosis y la endocitosis. La vía exocítica media el transporte de proteínas sintetizadas en el retículo endoplasmático rugoso, a través del aparato de Golgi, hasta su destino final: vertido al medio extracelular, acumulación en gránulos secretores, inserción en la membrana plasmática o transporte hasta los lisosomas. Se sigue la vía endocítica para acarrear las macromoléculas incorporadas por invaginación de la membrana plasmática hasta su destino final, a saber, el de su reciclado al medio extracelular o el de su degradación en los lisosomas.

¿Cómo sabe la célula qué componentes deben ser transportados y cuáles tienen que permanecer en un determinado compartimiento? Se acepta que el destino final de una macromolécula depende de ciertos marcadores incluidos en su estructura. Hay señales de retención, que determinan la permanencia de ciertos polipéptidos en orgánulos específicos; por ejemplo, las proteínas solubles dotadas de una secuencia KDEL de aminoácidos en su extremo carboxílico quedan retenidas en el retículo endoplasmático. (La abreviatura KDEL surge de la nomenclatura que designa a cada aminoácido por una letra; en ese caso, lisina, ácido aspártico y otros.) Hay señales, también, de transporte; una de ellas, los residuos manosa-6-fosfato presentes en las cadenas glicosídicas de enzimas hidrolíticas ácidas, indican el transporte de estas enzimas hacia los lisosomas.

Para cumplir su misión ordenadora del movimiento de las macromoléculas, estas señales necesitan ser reconocidas como tales por receptores instalados en las membranas. Se han identificado dos proteínas que unen manosa-6-fosfato y están involucradas en la acumulación de estas enzimas en los lisosomas. Se supone que el receptor que se engarza con la señal KDEL participa en el transporte retrógrado de proteínas desde otros puntos hacia el retículo endoplasmático.

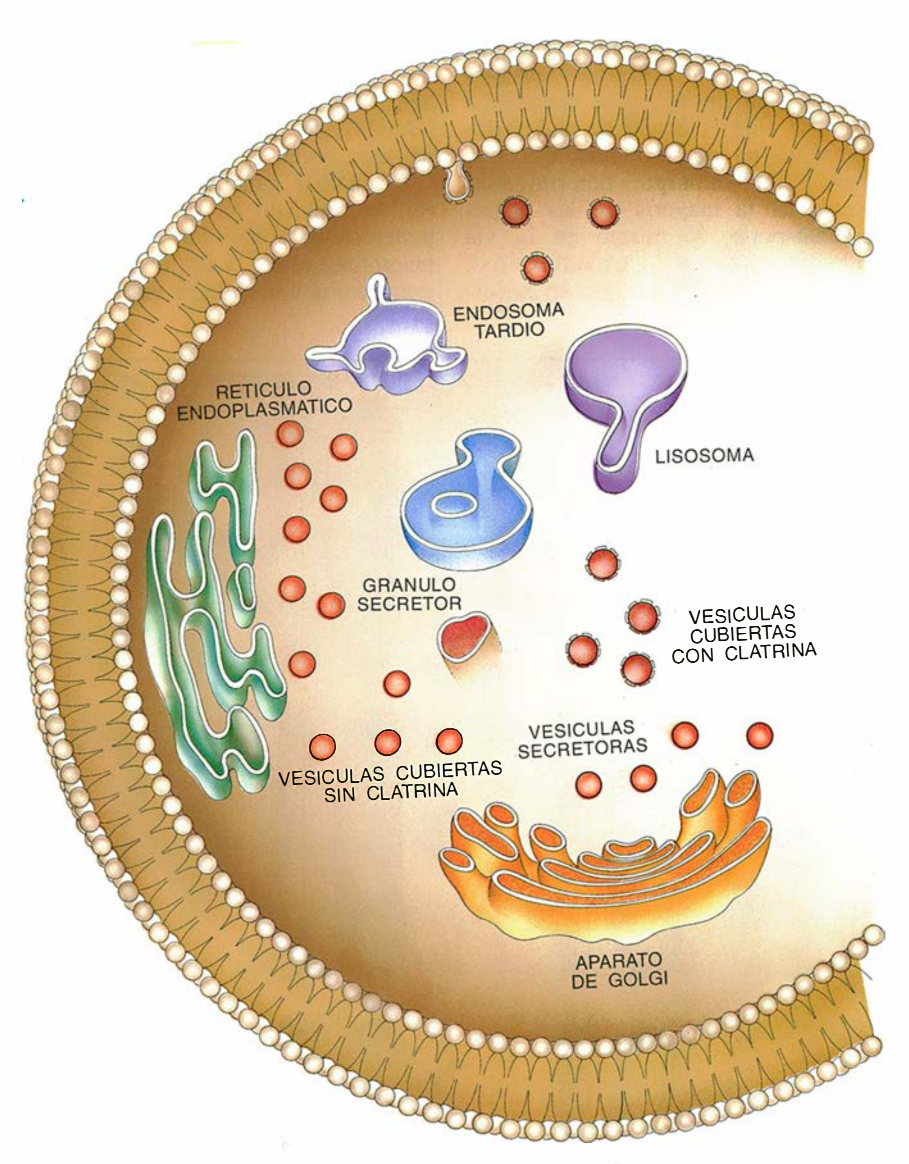
Existe, además, una amplia diversidad de receptores endocíticos instalados en la membrana plasmática que reconocen determinadas macromoléculas del medio extracelular y guían el tráfico intracelular de las mismas. Estos receptores siguen caminos definidos dentro de las vías endocíticas y exocíticas, lo que posibilita el di-

LUIS S. MAYORGA y MARIA ISABEL COLOMBO comparten el mismo interés científico en el transporte endocítico. Mayorga, del Consejo de Investigaciones de Argentina, es profesor de la Universidad nacional de Cuyo. Tras doctorarse en bioquímica por la Universidad nacional de San Luis, completó su formación en la de Washington. Colombo se halla en esta última desde 1989, tras recibir el doctorado en la Universidad Juan Agustín Maza.

reccionamiento intracelular de sus ligandos.

Los modelos de transporte mediado por vesículas o por conexiones tubulares requieren la formación de vesículas o túbulos a partir de un compartimiento y la fusión de la vesícula o del túbulo con el compartimiento de destino. Un mismo compartimiento, los lisosomas por ejemplo, puede fluctuar entre una estructura predominantemente vesicular y una estructura en red tubular. Cambio de forma que requiere, a su vez, de la generación de túbulos o vesículas y la fusión entre membranas de compartimientos homólogos. Ahora bien, la formación de una vesícula o un túbulo no es un proceso espontáneo. Debe existir el aparato molecular que cree, en una zona de la membrana, un esbozo de vesícula que luego se desprenda constituyendo una vesícula independiente, o se elongue en un túbulo. Por su parte, la fusión de membranas requiere, en principio, el reconocimiento entre las membranas que deben fusionarse y un aparato molecular que induzca la fusión de las mismas.

¿Qué métodos se han utilizado para el estudio molecular del transporte en el interior de la célula? El tráfico intracelular de macromoléculas en las vías endocíticas y exocíticas se ha venido abordando desde planteamientos morfológicos y bioquímicos. Sin embargo, la complejidad del sistema de endomembranas celulares y la falta de accesibilidad al citoplasma celular hacía muy difícil explorar los mecanismos moleculares que median y regulan este transporte.



1. EN LAS CELULAS EUCARIOTAS las proteínas sintetizadas en el retículo endoplasmático rugoso deben viajar a través de varios compartimientos membranosos antes de ser secretadas o arribar a su destino final en el interior celular. El material incorporado en la célula por endocitosis atraviesa distintos compartimientos endosómicos para acumularse en lisosomas o ser reciclado al medio extracelular.

Ha sido preciso esperar el advenimiento de nuevas técnicas y nuevos modelos. El desarrollo de ensayos que reconstituyen diferentes etapas del transporte, en homogeneizados celulares o en células permeabilizadas, resultó decisivo para entender qué acontece en el interior. Se puede ya manipular el sistema porque se ha levantado la barrera de la membrana plasmática, bien rompiendo la célula (homogeneización) o abriendo amplios poros en la membrana (permeabilización). La información que se puede obtener así es múltiple. El estudio de la composición del medio y de las condiciones en las cuales se provoca el transporte permite definir los requerimientos para el proceso; la inclusión, en el ensayo, de inhibidores o activadores específicos de determinadas moléculas nos aclara qué papel desempeñan éstas en la etapa de transporte reconstituida. Tales ensayos sirven de base, además, para la purificación de factores.

El punto crucial estriba en lograr que el transporte entre compartimientos genere una señal medible. En un modelo pionero, el equipo de James Rothman, de la Universidad de Stanford, recreó *in vitro* el tránsito de una proteína vírica entre cisternas del aparato de Golgi. La señal generada en el transporte fue la incorporación de *N*-acetilglucosamina, cuando esta proteína arribó a un compartimiento que contenía la enzima *N*-acetilglucosamina transferasa. El éxito obtenido hizo que numerosos laboratorios se pusieran a recrear *in vitro* diferentes etapas del transporte intracelular. A uno de nosotros (Mayorga), cuando entró en el año 1987 como postdoctorado en el laboratorio de Philip Stahl, de la Universidad de Washington, se le encomendó, en colaboración con Rubén Díaz, desarrollar un sistema para el estudio de la vía endocítica. El método elegido se basaba en dos proteínas que son reconocidas por el receptor de la manosa (receptor endocítico que expresan varios tipos de macrófagos).

Cuando se fusionan dos endosomas que alojan las dos proteínas en cuestión, forman éstas un complejo que puede ser aislado y cuantificado. Para adaptar el ensayo a las condiciones de la microscopía electrónica se emplean partículas de oro coloidal de distintos tamaños; en este caso, la fusión se identifica por la aparición de vesículas portadoras de oro coloidal de dos tamaños.

La comparación de los resultados obtenidos mediante diversos ensayos *in vitro* han llevado a la conclusión según la cual la fusión de endomembranas es un proceso complejo, que repite, sin embargo, determinadas pautas en la mayoría de las etapas de transporte, lo mismo en la vía endocítica que en la exocítica. Así, el proceso requiere energía en la forma de ATP y proteínas citosólicas y de membrana. Una de estas proteínas, NSF (factor sensible a *N*-etilmaleimida), se precisa en varias fases del transporte.

El análisis genético de las levaduras se convirtió en otra herramienta poderosa para abordar el tráfico de macromoléculas. Las levaduras son organismos unicelulares eucariotas de relativa sencillez en cuyo análisis genético se ha progresado, hasta el punto de que podemos identificar, a partir de una mutante deficiente en una función, el gen responsable de la disfunción observada. Conocido el gen, se establece la proteína determinada por el mismo. Se han identificado mutantes de levaduras que presentan defectos en su función secretora (mutantes SEC) o en la guía de las macromoléculas hacia la vacuola, un compartimiento análogo al lisosoma en estas células (mutantes VPS). A través del análisis genético de tales mutantes se ha llegado a la caracterización de factores proteicos necesarios para el transporte.

En numerosos casos se han encontrado homologías entre los factores identificados por el análisis genético de las levaduras y los ensayos de reconstitución *in vitro*; en este sentido, se sabe que el factor deficiente en la mutante SEC18 es una proteína equivalente a NSF en levaduras. Estas observaciones sugieren que los procesos de transporte se apoyan en mecanismos que comparten varios elementos comunes, conservados en el curso de la evolución.

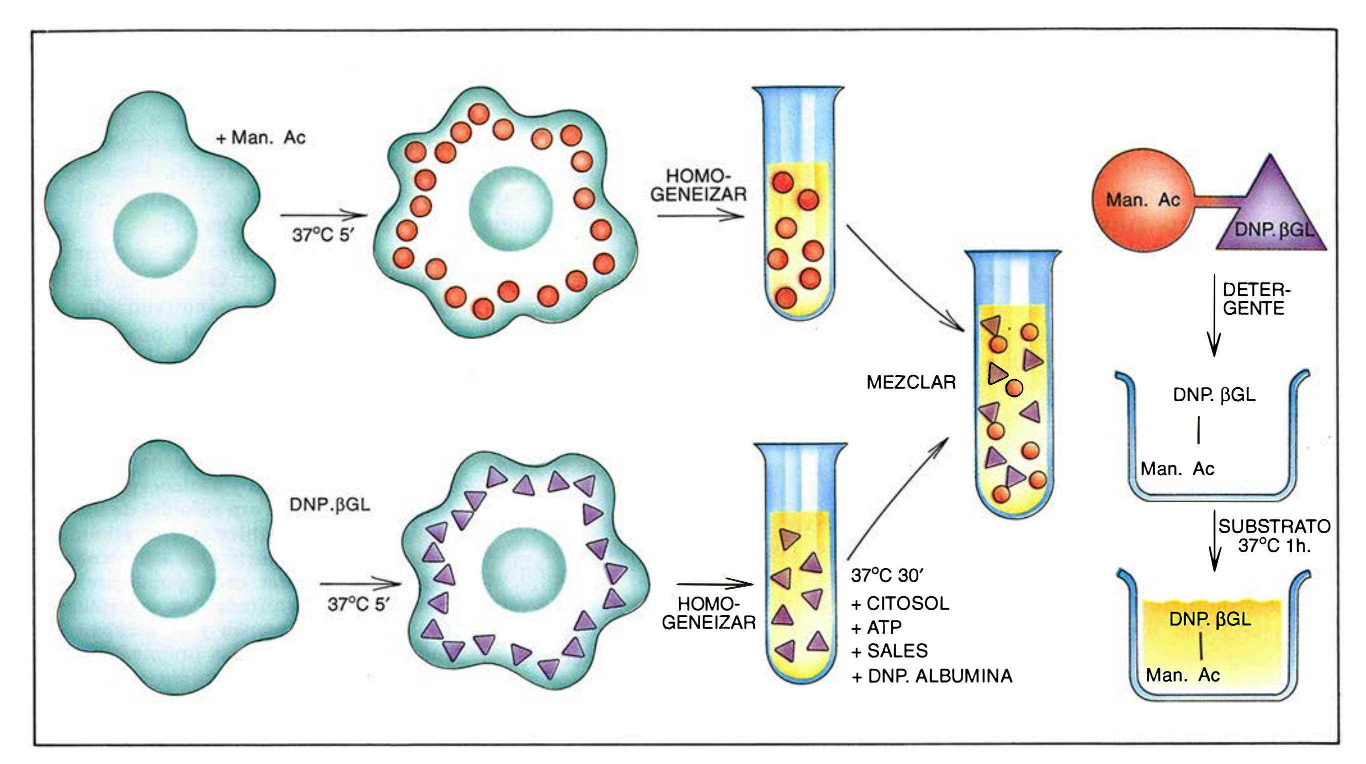
Hay otro elemento que ha ayudado a conocer el tráfico intracelular. Nos referimos a la brefeldina A. Este antibiótico induce la formación de túbulos en varios compartimientos intracelulares, tanto de la vía exocítica como endocítica, amén de alterar la distribución y transporte de proteínas.

Estos nuevos modelos y técnicas han permitido identificar una serie de proteínas que intervienen en el transporte intracelular. Llama la atención que varias de estas proteínas tengan la particularidad de ser reguladas por GTP (en adelante, GTP-proteínas).

2. TRANSPORTE DE ELEMENTOS entre compartimientos intracelulares. El transporte vesicular (*izquierda*) se efectúa por medio de vesículas que se desprenden de las membranas de ciertos orgánulos, viajan por el citoplasma y se fusionan con la membrana del compartimiento de destino. Ciertas vesículas portan en su superficie una proteína denominada clatrina, que liberan antes de la fusión. En el transporte mediado por túbulos (*centro*), la membrana de un compartimiento se elonga en una formación tubular que acabará por fusionarse con la membrana de destino. Por último, ciertos compartimientos, debido a múltiples etapas de transporte en las cuales pierden componentes y adquieren otros, pueden sufrir transformaciones importantes en su composición y estructura, proceso conocido como maduración (*derecha*).

Las GTP-proteínas abarcan una serie de familias de proteínas que se engarzan con el guanosín trifosfato (GTP) y guanosín difosfato (GDP), dos nucleótidos con funciones diversas en el metabolismo celular. Estas proteínas cumplen un ciclo entre una forma inactiva unida a GDP y una forma activa unida a GTP. En general, se pasa a la forma unida a GTP mediante la interacción con un activador específico que estimula el intercambio de GDP por GTP, mientras que el regreso a la forma inactiva se logra por hidrólisis de GTP en GDP.

En razón de su estructura, las GTP-proteínas se dividen en heterotriméricas y monoméricas. Las heterotriméricas, o proteínas G, constan de tres subunidades: α, β y γ. La



3. FUSION DE MEMBRANAS. La reconstitución *in vitro* de la fusión entre endosomas ha permitido estudiar los factores proteicos involucrados. El sistema desarrollado por Rubén Díaz y Luis Mayorga se basa en dos proteínas que son reconocidas por un receptor de la manosa: la β-glucuronidasa, a la que se le unen grupos dinitrofenilos (DNP.βGlu), y un anticuerpo monoclonal que reconoce dinitrofenol (Man.Ac). La enzima es un ligando natural del receptor de la manosa, mientras que al anticuerpo se le incorporan residuos manosilos. Se incuban macrófagos con cada ligando por separado para que se vayan incorporando en vesículas endocíticas; las células se rompen preservando intactos los endosomas; se mezclan las vesículas portadoras de la enzima con otras que contengan el anticuerpo y se incuban en un medio de citosol, ATP y DNP.albúmina; si las vesículas se fusionan, el anticuerpo se une a la enzima. Se disuelven las membranas en presencia de DNP.albúmina y se precipita el anticuerpo en placas plásticas recubiertas con un segundo anticuerpo que reconoce al primero; se determina la actividad enzimática asociada al anticuerpo precipitado, a modo de indicador de la fusión.

subunidad alfa (G_α), con un peso molecular de unos 40 a 50 kilodaltons, se une a una molécula de GDP o de GTP e interacciona en su estado inactivo con las dos subunidades restantes; estas últimas ($G_{\beta\gamma}$) se hallan fuertemente trabadas entre sí.

Las proteínas G cumplen la misión de transductores de señales extracelulares. Actúan como intermediarios entre un estímulo extracelular que activa un receptor de la membrana plasmática y la producción de segundos mensajeros intracelulares. En ellas, el intercambio de GDP por GTP viene urgido por el receptor activado. Los receptores suelen ser proteínas que atraviesan la membrana siete veces y presentan, por tanto, varios segmentos ubicados sobre ambos lados de la membrana. Por ejemplo, cuando la adrenalina se une al receptor adrenérgico, se produce un cambio conformacional en éste, tal, que expone un péptido en la cara citoplasmática de la membrana, el cual interacciona con una proteína G (Gs) y promueve entonces el intercambio de GDP por GTP. El ingreso de GTP libera la subunidad G_α que, en su estado activo, es capaz de interaccionar con un efector específico. En el caso de Gs, la subunidad $G_{\alpha s}$ interacciona con la adenilil ciclasa, para producir AMP cíclico, un poderoso segundo mensajero intracelular. El círculo se cierra cuando la actividad GTPasa endógena de $G_{\alpha s}$ hidroliza el GTP en GDP y la G_α se reasocia con $G_{\beta\gamma}$. Recientemente se ha observado que, en ciertos casos, la interacción con el efector estimula la actividad GTPasa de G_α, promoviendo un cierre más eficiente del ciclo.

Las GTP-proteínas monoméricas comprenden una nutrida familia de proteínas con un peso molecular de 20 a 25 kilodaltons, que guardan cierta homología entre sí. El prototipo lo constituye ras21, proteína de la que se ha obtenido su cristalización y análisis en su forma activa, unida a GTP, e inactiva, unida a GDP.

No está bien definido en este caso qué proteínas promueven el intercambio de GDP por GTP y, por tanto, la activación de estas GTP-proteínas monoméricas. Sí se han identificado algunos factores proteicos capaces de promover o inhibir la disociación de GDP. Una vez en su forma activa, con GTP unido, las GTP-proteínas monoméricas necesitan asociarse con otro tipo de proteínas denominadas GAP para poder hidrolizar el GTP y así cerrar el ciclo de activación-desactivación. Estas proteínas regulan funciones celulares importantes y diversas que incluyen la proliferación celular y la organización del citoesqueleto.

¿Cuáles fueron las primeras pruebas de que GTP-proteínas intervenían en el tráfico intracelular? En los ensayos *in vitro*, el grupo encabezado por James Rothman, de la Universidad de Stanford, demostró que la presencia de un análogo no hidrolizable de GTP, denominado $GTP_\gamma S$, bloquea el transporte entre cisternas del aparato de Golgi en presencia de un exceso de citosol. $GTP_\gamma S$ es un poderoso activador de todas las GTP-proteínas, ya que las mantiene en su forma activa. Por otra parte, observamos en la fusión entre endosomas que el $GTP_\gamma S$ ejercía un efecto dual: a concentraciones bajas de citosol, insuficientes para obtener fusión óptima, el análogo de GTP activaba la fusión, mientras que a concentraciones saturantes de citosol

inhibía la fusión. Además, el análisis de cierta mutante de levadura con deficiencias en su función secretoria, denominada SEC4, permitió al equipo de Peter Novick, de la Universidad de Yale, identificar a una GTP-proteína monomérica necesaria para el transporte exocítico.

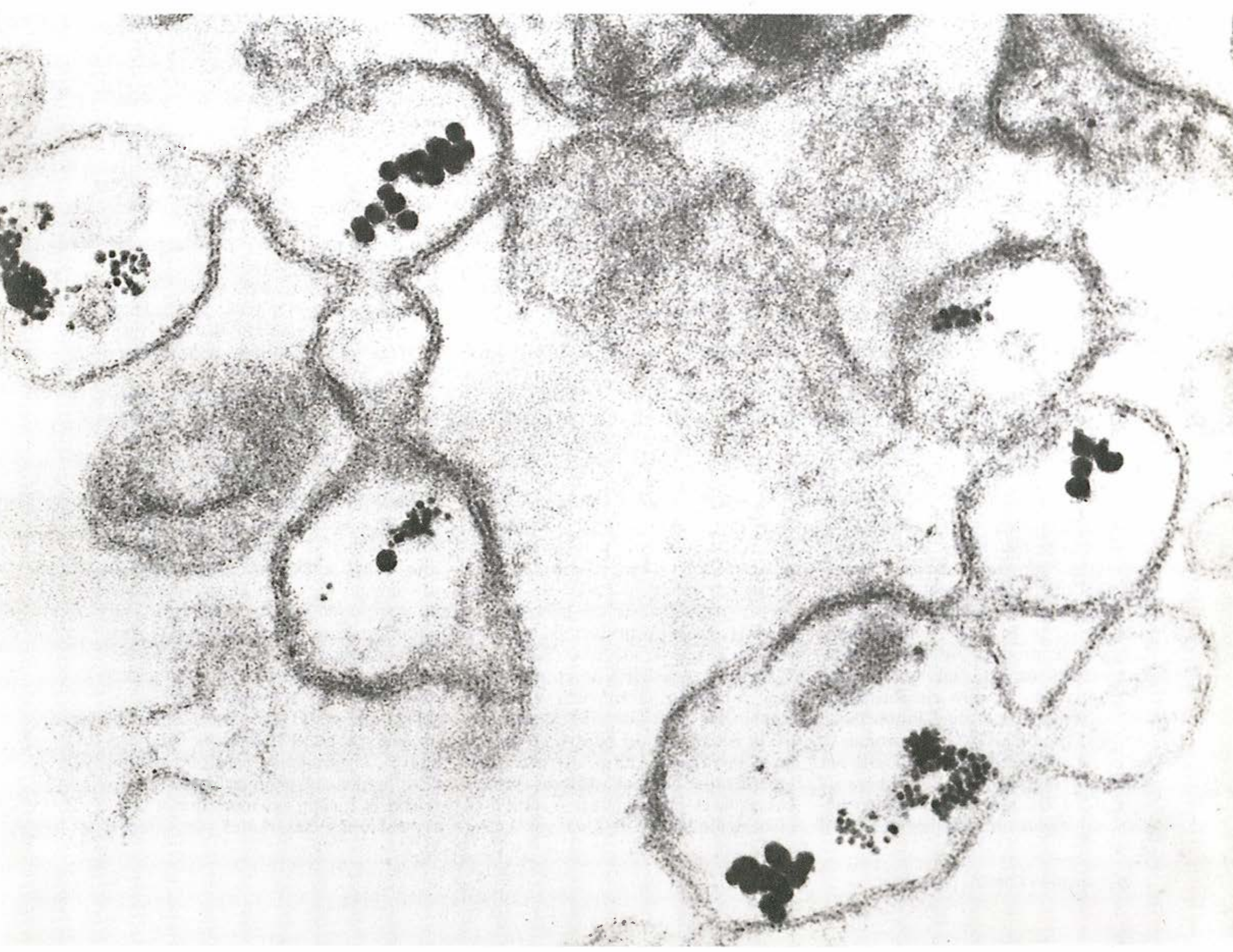
En la búsqueda de GTP-proteínas implicadas en el transporte, llamaron la atención, por su especificidad de localización, las rab. Cada miembro de este grupo de GTP-proteínas monoméricas se asocia con estructuras subcelulares específicas; a modo de botón de muestra: rab4 y rab5 se asocian con endosomas tempranos.

El grupo dirigido por Jean Gruenberg, del Laboratorio Europeo de Biología Molecular en Heidelberg, demostró *in vitro* que los anticuerpos anti-rab5 inhibían la fusión entre endosomas. Estas observaciones *in vitro* se confirmaron en las investigaciones con células intactas que sobreexpresan rab5 y rab4. Por otra parte, el equipo de William Balch, del Instituto Scripps de Investigaciones, ha observado que la expresión de rab1 y rab2 con mutaciones que afectan su función normal bloquea el transporte de proteínas entre el retículo endoplasmático y el aparato de Golgi.

A pesar de la falta de definición del mecanismo de acción de estas GTP-proteínas, los resultados indicaban que el efecto de GTPγS en el transporte venía mediado por GTP-proteínas monoméricas. Pero algunos datos sugerían la posibilidad de que hubiera involucradas otras GTP-proteínas. Por un lado, los complejos de fluoruro de aluminio inhibían *in vitro* la fusión entre endosomas y el transporte en el aparato de Golgi; se trata de complejos capaces de activar GTP-proteínas heterotriméricas pero no monoméricas. Por otro lado, en el aparato de Golgi se localizó una GTP-proteína heterotrimérica del tipo Gi3, cuya expresión en exceso se interponía en el proceso secretor de proteoglicanos.

Con el propósito de dilucidar si las proteínas G intervenían en la fusión entre endosomas, uno de nosotros, Mayorga, para entonces en el Instituto de Histología y Embriología de Mendoza, estudió una serie de péptidos (así el mastoparán), que adquieren una conformación semejante a la que posee la región expuesta por ciertos receptores activados (el adrenérgico, por ejemplo). Estos péptidos promueven el intercambio GDP-GTP en proteínas G.

Los péptidos lograron revertir el efecto ejercido por GTPγS en la fusión, sugiriendo la intervención de unas proteína G en el proceso de fusión. La otra autora (Colombo) apor-



4. ADAPTACION para microscopía electrónica del ensayo descrito en la figura 3. En vez de enzima y anticuerpo, se utilizan partículas de oro coloidal de dos tamaños distintos cubiertas con albúmina manosilada. Las partículas son reconocidas por el receptor correspondiente a la manosa e internalizadas en macrófagos. Las células se rompen y se incuban los endosomas. Se fijan las preparaciones y se analizan por microscopía electrónica de transmisión. La fusión entre endosomas se determina por la presencia de vesículas que alojan dos tipos de oro. En la figura se aprecian vesículas con partículas de 5 y 20 nm, producto de la fusión de varios endosomas.

tó una prueba más contundente, cuando observó la inhibición de la fusión por subunidades $G_{\beta\gamma}$. Se cuenta ahora con numerosos indicios de la participación de diversas proteínas G en el tráfico intracelular. El grupo de Keith Mostov, de la Universidad de California, ha observado que una Gs está involucrada en la producción de vesículas que median el transporte de moléculas entre dos regiones de la membrana plasmática de células polarizadas, fenómeno conocido como transcitosis. Por su parte, el equipo de Richard Klausner, del norteamericano Instituto Nacional de la Salud, ha demostrado que las subunidades $G_{\beta\gamma}$ inhiben la unión a membranas de varias proteínas de la cubierta de las vesículas de transporte, tales como ARF y β-COP. Muchos de estos fenómenos son sensibles a la acción de la toxina colérica y la pertussis, que afectan específicamente ciertos tipos de G_{α}.

Abundan, pues, las pruebas de la participación de las proteínas G en el tráfico intracelular de macromoléculas. Pero, ¿qué proteínas G en concreto son las responsables? Varios grupos, incluido el nuestro, han encontrado pistas de la presencia de proteínas Gi y Gs en diversas etapas del transporte.

FAMILIAS DE GTP-PROTEINAS INVOLUCRADAS EN EL TRANSPORTE INTRACELULAR

GTP-PROTEINAS	FUNCION	PRUEBAS
Triméricas (proteína G)	Transducción de señales	La sobreexpresión de Gi bloquea la secreción. Compuestos que activan G inhiben o activan el transporte. Subunidades $G\beta\gamma$ inhiben la fusión.
rab	?	Anticuerpos anti-rab y péptidos de rab bloquean el transporte *in vitro*. La expresión de rab defectuosos bloquea el transporte en células intactas.
ARF	Factor de ADP-ribosilación de $G\alpha$ mediado por toxina colérica.	La deficiencia ARF en levaduras bloquea la secreción. ARF bloquea el transporte *in vitro* en presencia de GTPγS.
rho	Control de la polimerización de actina.	La ADP-ribosilación de rho afecta la estructura de compartimientos intracelulares.

La lista de GTP-proteínas comprometidas en el proceso de transporte no se agota en G y rab. Existe otra familia de GTP-proteínas monoméricas, ARF, que guarda escasa homología con ras. Se sabía que los ARF constituían factores requeridos para la ADP-ribosilación de G_{α} mediada por toxina colérica, pero se desconocía su misión fisiológica en el interior celular. Sorprendió, pues, cuando el grupo de Kahn, del Instituto Nacional de la Salud, observó que las levaduras deficientes en estas proteínas presentaban anomalías secretorias. Además, Melançon, de la Universidad de Colorado, ha demostrado que el factor citosólico requerido para la inhibición del transporte en el aparato de Golgi en presencia de GTPγS es un ARF. Utilizando el ensayo de fusión entre endosomas, Lenhard, del laboratorio de Stahl de la Universidad de Washington, ha comprobado que ARF1 inhibe la fusión de endosomas en presencia de GTPγS.

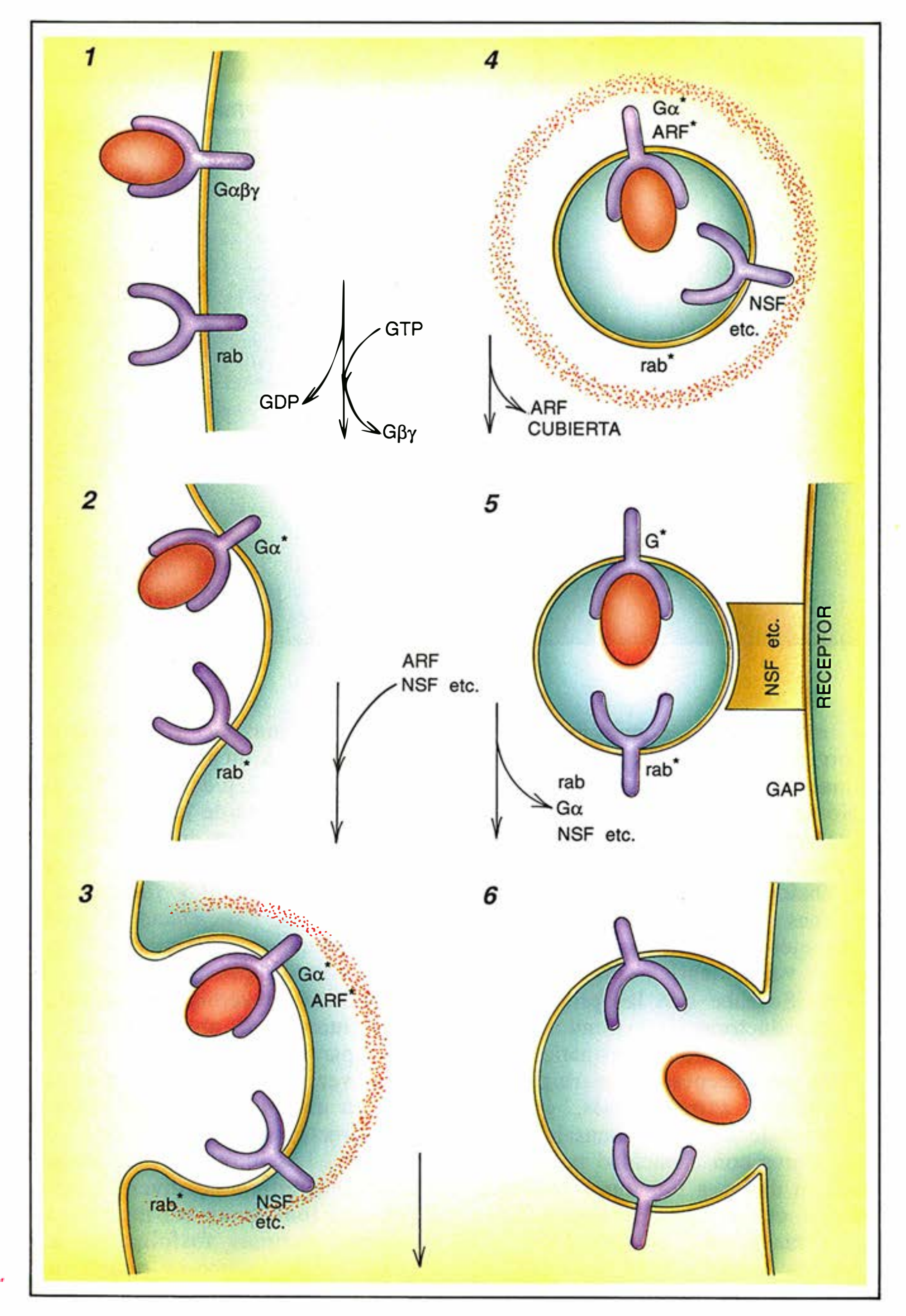
Por último, la ADP-ribosilación de una GTP-proteína monomérica de tipo rho produce un efecto sobre la morfología y función del aparato de Golgi muy semejante al observado en presencia de brefeldina A. Las rho constituyen un grupo de GTP-proteínas monoméricas comprometido en la organización de los filamentos de actina.

No se conoce todavía bien en qué etapa del proceso de transporte entra en escena una u otra GTP-proteína. Por analogía con el papel que estas proteínas desempeñan en otros sistemas mejor caracterizados, se han elaborado varias teorías sobre sus funciones. Se sabe que las proteínas G son transductoras de estímulos a través de la membrana plasmática. Activadas por receptores que responden a estímulos extracelulares, generan una serie de segundos mensajeros intracelulares con capacidad para intervenir en diversas funciones celulares. Podrían cumplir una misión análoga en el transporte.

Hemos aludido a la presencia de receptores que determinan la localización de proteínas con determinadas señales en el interior de la célula; así, el receptor de KDEL, que retiene las proteínas en el retículo endoplasmático, o el receptor de manosa 6-fosfato, que guía a las enzimas lisosómicas. Estos receptores son proteínas que atraviesan las membranas y podrían, por sí solas o mediante la unión a un ligando en el medio intravesicular, transmitir una señal a la cara citoplasmática de la vesícula; allí, una proteína G podría activarse y desencadenar el inicio del proceso. Se sabe que uno de los receptores de manosa-6-fosfato interactúa con una Gi. El fenómeno desencadenado por la activación de la proteína G podría ser la unión a las vesículas de proteínas de la cubierta. Hay pruebas directas de la intervención de proteínas G en la unión de ARF y β-COP a membranas del aparato de Golgi. Se piensa que los espectaculares efectos de la brefeldina A se deben a que esta droga interfiere con la unión de proteínas de la cubierta —como β-COP y γ-adaptina a las membranas. Este efecto se anula si previamente las membranas son tratadas con compuestos que estimulan proteínas G; verbigracia, complejos de fluoruro de aluminio, GTPγS y mastoparán.

A su vez, las proteínas G podrían actuar en una segunda etapa en procesos directamente relacionados con la fusión. Las proteínas G pueden regular la apertura de diversos tipos de canales iónicos en las membranas y activar enzimas fosfolipasas. La apertura de los primeros podría iniciar la fusión entre las membranas y la activación de las fosfolipasas podría contribuir a la desestabilización de las membranas que se fusionan. En el ensayo de fusión entre endosomas hemos comprobado que se requiere que opere una fosfolipasa A2, enzima que puede ser activada por proteínas G.

Se sabe muy poco sobre la función que desempeñan las proteínas rab. Por su localización en los distintos compartimientos intracelulares las suponemos relacionadas con la especificidad de la fusión. Las GTP-proteínas podrían asegurar el carácter direccional del proceso, activándose al iniciarse el transporte y desactivándose al completarse el mismo. En vista del ciclo de asociación y disociación con membranas que sufren algunas de ellas, se ha propuesto



5. FUNCION DE LAS GTP-PROTEINAS en el transporte. Podría obedecer al siguiente modelo, que procede de arriba abajo, empezando por la columna de la izquierda: la unión de una molécula a un receptor de transporte activaría una proteína G. La proteína G activada (*asterisco*) promovería el ensamblaje de las cubiertas sobre las vesículas de transporte en colaboración con ARF. Desde muy pronto, podrían incorporarse factores que intervinieran en el proceso de guía (quizá las proteínas rab) y el proceso de fusión (NSF). Se produciría entonces la liberación de la vesícula de transporte. La cubierta se disgrega y la vesícula interaccionaría con el compartimiento de destino; podría éste contener señales de reconocimiento para rab y, tal vez, su correspondiente GAP. El contacto con factores en esta nueva membrana podría activar los mecanismos de fusión y desencadenar la unión entre las vesículas; otra proteína G —o la misma— podría actuar activando una fosfolipasa o abriendo canales iónicos. Las GTP-proteínas se inactivarían pasando a su estado unido a GDP y los factores podrían reciclar para su aprovechamiento en un nuevo proceso de transporte.

que, en una primera etapa, la proteína en su estado inactivo se uniría a la membrana del compartimiento dador. Ante un estímulo desconocido, la GTP-proteína se activaría, intercambiaría GDP por GTP e iniciaría el transporte. La interacción de la GTP-proteína con su GAP específica, localizada en el compartimiento de destino, provocaría la hidrólisis de GTP en GDP; en virtud de lo cual, la GTP-proteína podría liberarse al citoplasma para su reciclado e incorporación en otro ciclo de transporte.

En los últimos años se ha avanzado mucho en el conocimiento de los mecanismos moleculares que median y regulan el tráfico intracelular de macromoléculas en las vías endo y exocíticas. Sin embargo, los resultados obtenidos no logran dilucidar el complejo sistema que han desarrollado las células eucariotas para asegurar el correcto flujo de membranas y contenidos entre los diferentes compartimientos subcelulares.

El estado actual del conocimiento se parece a un rompecabezas a medio armar, donde se ha logrado completar importantes pedazos correspondientes al cielo, al lago y a las montañas, sin que podamos, no obstante, ensamblar esos elementos en un paisaje. Se han descubierto conexiones entre las observaciones relativas a las GTP-proteínas heterotriméricas, ARF, proteínas de la cubierta de vesículas de transporte y efectos de brefeldina A. Por otro lado, disponemos de información sobre la naturaleza de las GTP-proteínas monoméricas, su papel en transporte en levaduras y en células de mamíferos, su regulación por fosforilación y su interacción con otras proteínas involucradas en el tráfico intracelular.

Por último, la purificación de NSF ha permitido la identificación de una cantidad de factores necesarios para su función. Pero ignoramos qué relación existe entre GTP-proteínas heterotriméricas, monoméricas y NSF. En este campo en continuo avance esperamos que en poco tiempo surjan nuevas observaciones que acaben por vertebrar todos esos datos dispersos. De todos modos, el grado de complejidad que se adivina hace pensar que pasarán muchos años antes de que se logre ubicar la última pieza del rompecabezas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SMALL GTP-BINDING PROTEINS AND THEIR ROLE IN TRANSPORT. Bruno Goud y Mary McCaffrey en *Current Opinion in Cell Biology*, vol. 3, págs. 626-633, 1991.

BREFELDIN A: INSIGHTS INTO THE CONTROL OF MEMBRANE TRAFFIC AND ORGANELLE STRUCTURE. Richard D. Klausner, Julie G. Donalson y Jennifer Lippincott-Schwartz en *The Journal of Cell Biology*, volumen 116, págs. 1071-1080, 1992

ROLE OF HETEROTRIMERIC G PROTEINS IN MEMBRANE TRAFFIC. Morgane Bomsel y Keith Mostov en *Molecular Biology of the Cell*, vol. 3, págs. 1317-1328, 1992.

VESICULE-MEDIATED PROTEIN SORTING. Nancy K. Pryer, Linda J. Wuestehube y Randy Schekman en *Annual Review of Biochemistry*, vol. 61, págs. 471-516, 1992.

Ondas de densidad de carga y de espín

En ciertos metales los electrones forman patrones cristalinos que se mueven al unísono, responden de manera característica a los voltajes aplicados y muestran auto-organización

Stuart Brown y George Grüner

En las cálidas tardes de julio, el Mall de Washington, D.C., está abarrotado de turistas, que, con cara de entendidos y sus termos a cuestas, zigzaguean de los museos a los monumentos y de los monumentos a las cafeterías. La mayoría de las calles que bordean las zonas verdes son llanas, y van tantos turistas en una dirección como en otra. De repente suena un redoble de tambor: está a punto de reunirse una banda de música. En las calzadas se forman cerradas filas de estudiantes, que desplazan a la confusa muchedumbre. La banda se ordena pronto en hileras, imperturbable a los correteos del crío que se esconde de la persecución de su madre entre las piernas de los trompetistas. Ante la mirada expectante de los turistas, la banda se pone a tocar y, con un estrépito de platillos, emprende el desfile.

Sépanlo o no, los que acuden al Mall están remedando el comportamiento de los electrones en los metales corrientes. Enfriados a temperaturas próximas al cero absoluto, la mayoría de los metales permanecen en tal estado; es decir, los electrones continúan errando en ellos. Pero hay algunos metales donde los electrones se auto-organizan en patrones regulares, como las filas de una banda en marcha.

STUART BROWN y GEORGE GRÜNER comparten un mismo interés por la dinámica de las ondas de densidad de carga, los terremotos y otros sistemas estimulados. Grüner, doctorado en Budapest en 1971, ha venido enseñando física en la Universidad de California en Los Angeles (UCLA), desde 1981, centro que le concedió el doctorado a Brown en 1988. Este completó su formación en el Laboratorio Nacional de Los Alamos y en la Universidad de Florida, para volver como docente a UCLA en 1991.

Robert E. Peierls concibió, a principios de los años treinta, la posibilidad de tales filas ordenadas de electrones, conocidas también por ondas de densidad de carga (ODC). Se descubrió su existencia real en los años setenta. Un fenómeno emparentado con éste, las ondas de densidad de espín (ODS), fue predicho por Albert W. Overhauser en 1960; estas ondas se vieron en los años setenta. Por un tiempo se sugirió que las ODC eran las responsables de la superconductividad. Hoy sabemos que la superconductividad tiene un origen distinto. Llegará quizás el día en que las ondas de densidad de carga pudieran encontrar aplicación como condensadores variables en circuitos electrónicos o como detectores de radiación electromagnética extremadamente sensibles.

Conéctese una batería a los extremos de un sólido en el que haya una ODC y aplíquese a través de éste un voltaje. Si el voltaje es suficientemente pequeño, no pasa nada: en la metáfora, los zapatos de los estudiantes están pegados al suelo con goma. (El acoplamiento es débil, de manera que las ODC tienen una "constante dieléctrica" que es varios millones de veces la de los semiconductores, lo que les permite almacenar enormes cantidades de carga; de ahí su uso potencial como condensadores.) Pero si se incrementa el voltaje más allá de cierto umbral, los zapatos se sueltan y la banda empieza a desfilar: la corriente es intensa. La corriente no será proporcional al voltaje, tal como sucede en los metales ordinarios que cumplen la ley de Ohm; por el contrario, aumentará muchísimo con pequeñas elevaciones del voltaje. Además, una pequeña parte de la corriente total oscilará con el tiempo, aun cuando sólo se haya aplicado un voltaje constante.

Las ODC presentan una respuesta "auto-organizada" a las fuerzas externas aplicadas. De hecho, el concepto de criticidad auto-organizada surgió de los primeros trabajos sobre las ondas de densidad de carga. La especialidad que lo estudia trata de los movimientos de sistemas complejos, del estilo de las montañas de arena o las redes de fallas sísmicas. Supongamos que dejamos caer arena sobre una superficie. Se apilará y formará un cono, cuya inclinación llegará a ser tal que bastará con añadir un solo grano más para que se desencadene una avalancha. De manera análoga, las placas tectónicas están perpetuamente en delicadísimo equilibrio, al borde del terremoto. En determinadas circunstancias, las ODC se configuran por sí mismas de tal forma que cualquier ligero cambio en un campo eléctrico externo conduciría a una alteración drástica. Las ondas de densidad de carga constituyen, pues, un sistema que cabe poner sobre la mesa para comprobar las teorías de la auto-organización.

¿Por qué se forman las ondas de densidad? La causa profunda yace en la interacción entre los electrones del metal. Por lo normal, la presencia de iones positivos (átomos que han perdido uno o más electrones y tienen, por tanto, carga positiva) que forman el cuerpo del metal cancela la repulsión electrostática en-

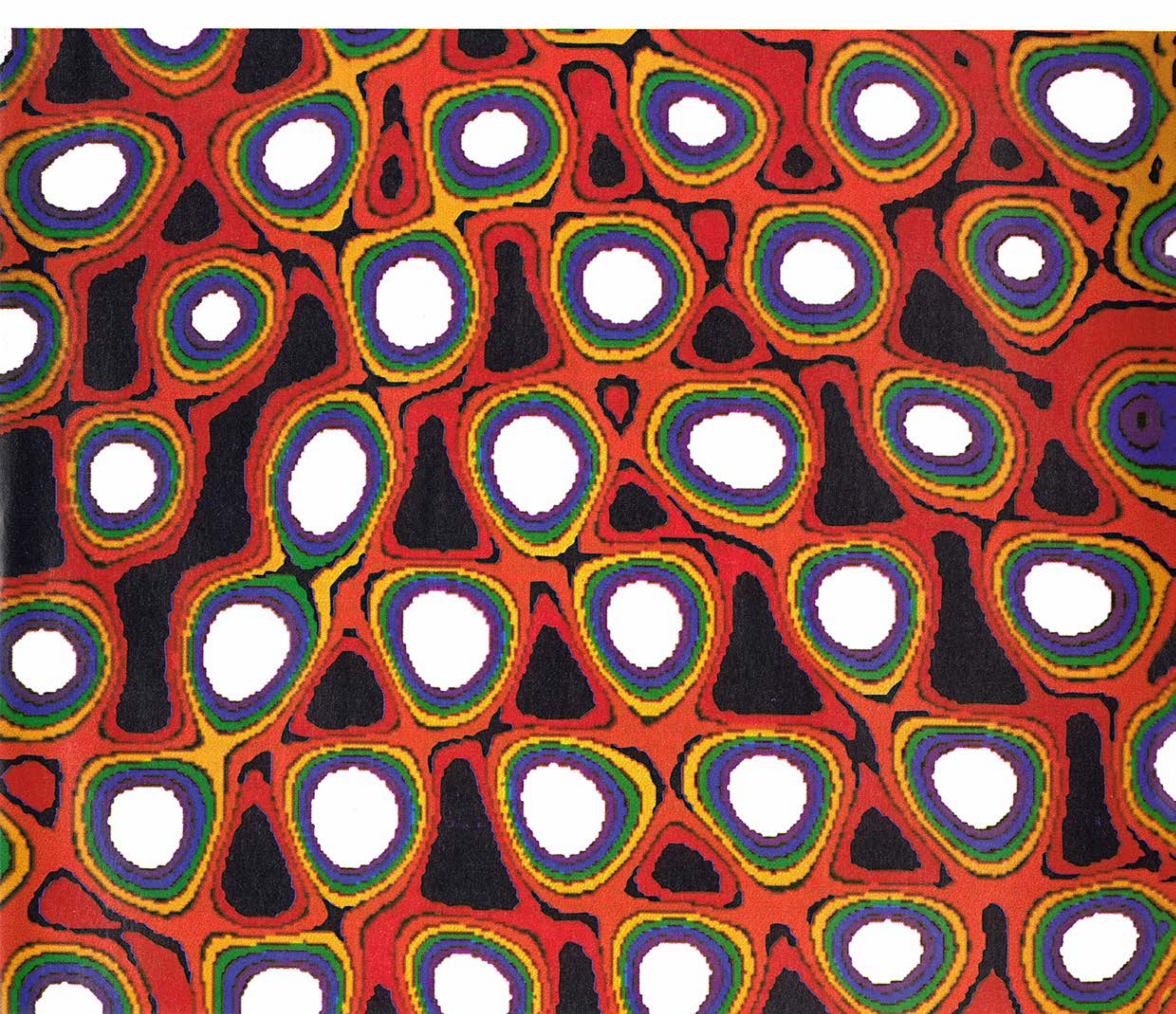
1. PATRON REGULAR de ondas de densidad de carga en el disulfuro de tántalo, descubierto con un microscopio de barrido de efecto túnel. Los picos de elevada densidad de carga (*blanco*), dispuestos en una configuración hexagonal, están separados entre sí 12 angstrom. Esta imagen de barrido nos la han ofrecido Robert V. Coleman y C. Gray Slough, de la Universidad de Virginia.

tre los electrones, dotados de carga negativa. Así, los electrones apenas se influyen entre sí. En tal situación, si imaginamos que los electrones son la muchedumbre que pasea descrita antes, la probabilidad de encontrar una persona, o un electrón, en un punto cualquiera será la misma, sin que importe el punto escogido. Así pues, la densidad de carga de los electrones es uniforme en el espacio. Supongamos ahora que los electrones interaccionan y modifican, por ejemplo, la red en la que se disponen los iones positivos; la red podrá, a su vez, influir en la posición de un segundo electrón, dando lugar a una interacción entre los electrones.

A menudo las interacciones promueven el emparejamiento de los electrones. Las parejas recién constituidas se repelen unas a otras. Cada pareja se sitúa cuan lejos puede de las demás, y se crea una estructura ordenada, como la de la banda en marcha; la densidad de carga se convierte en una colección de bultos. Al tomar en consideración la naturaleza ondulatoria de los electrones, aparece una suave variación espacial en la densidad de carga: una ODC.

Además de carga, los electrones portan espín. Por tal se entiende el momento magnético que cada electrón tiene asociado; los momentos pueden estar en uno de dos estados posibles: "arriba" y "abajo". Si los electrones con la misma orientación del espín se repelen entre sí, entonces cada espín "arriba" desea tener un espín "abajo" por vecino. El resultado es una onda de densidad de espín, que cabe imaginar como dos ODC superpuestas, una para cada estado de espín, con sus picos en posiciones alternas. Obsérvese que en una ODC la carga varía en el espacio, pero no en una ODS.

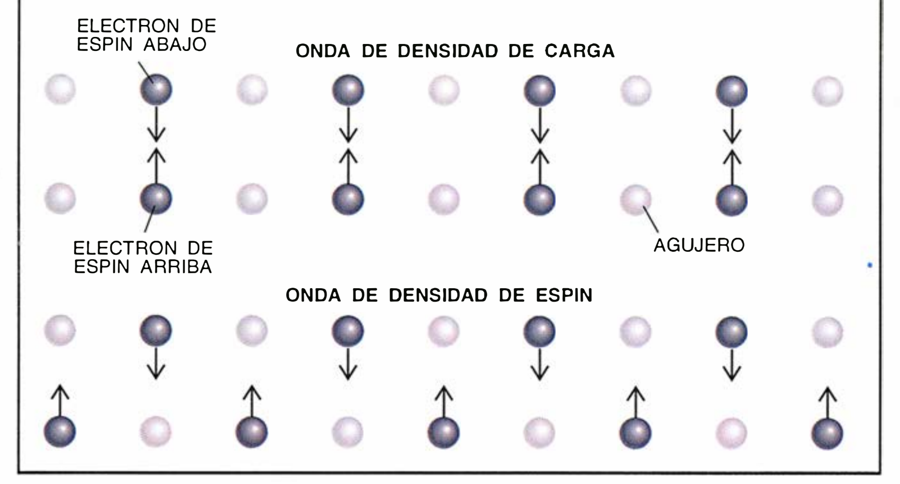
En general, el modo en que interaccionen los electrones y cuál sea la clase de estado mecánico-cuántico que se forme dependerán de cómo se confine el movimiento de los electrones. En tres dimensiones, los electrones desvían su camino y se evitan así unos a otros. Pero si se ven obligados a viajar a lo largo de una cadena de átomos, los electrones no pueden evitarse y tienden a interaccionar con mayor intensidad. Las ODC y las ODS aparecen sobre todo en los materiales donde los átomos se alinean en cadenas. (Muchos de ellos se empezaron a sintetizar a principios de los años setenta.) En algunas circunstancias los pares de electrones se atraen más que se repelen entre sí, y se establece un estado superconductor.



Formación de parejas

Podemos imaginar las ondas de densidad de carga (*arriba*) constituidas por parejas electrón-agujero o parejas electrón-electrón. (Llámase agujero al estado mecanocuántico no ocupado; actúa de manera muy parecida a una partícula.) Mirando la cadena, podemos suponer que los electrones se emparejan tanto con el agujero a su derecha o a su izquierda como con el electrón que tienen enfrente. (La superconductividad se debe a otra clase de apareamiento electrón-electrón.) En las ondas de densidad de espín (*abajo*), el electrón opuesto está desplazado, de manera que la densidad de carga total es constante; sin embargo, la de espín sube y baja a lo largo de la cadena.

El estado de emparejamiento que se produzca en un material dependerá de la intensidad de las distintas interacciones entre los electrones. Por ejemplo, si domina la repulsión electrostática directa entre los electrones, se propician o una onda de densidad de espín o un estado superconductor de espín paralelo (o "triplete"). Los electrones pueden también interaccionar distorsionando la red. La mediación de la red conduce a la atracción entre los electrones, lo que origina una onda de densidad de carga o un estado superconductor de espín antiparalelo (un "singlete").



A menudo, los químicos diseñan materiales cuya estructura presenta forma de cadena; sin embargo, no tienen mucho control sobre la naturaleza de las interacciones electrónicas. Así pues, no puede predecirse que la sustancia sintetizada desarrolle una ODC, una ODS o se haga superconductora.

Los electrones tienden a aparearse a bajas temperaturas. En el cero absoluto, cada electrón tiene su "compañero" y la estructura se halla totalmente ordenada. A medida que calentamos el material, algunas de las parejas se separan, lo que, a su vez, provoca que otras se separen también. Conforme aumenta la temperatura, crece el número de parejas divorciadas, hasta que se rompe la última; por encima de esa temperatura crítica, el material sólo tiene electrones libres y vuelve a ser un metal. A este proceso se le llama transición de fase, como a la fusión de un cubito de hielo. Si invertimos el proceso, al enfriar el material desde temperaturas elevadas se formará una ODC cuando crucemos la temperatura de transición de fase. Los electrones se quedarán entonces fijos. Debido a que ya no podrá desalojarlos un campo eléctrico pequeño y dejará de fluir la corriente, el metal se convertirá de golpe en aislante. Este cambio repentino en la conductividad eléctrica señala la formación de una ODC.

Se han realizado observaciones mucho más directas de ODC mediante microscopios de barrido de efecto túnel, que muestran la densidad de carga incluso a escala atómica. Además, una ODC está acompañada de distorsiones de la red. La estructura distorsionada, denominada superred, puede verse por difracción de rayos X: los iones dispersan los rayos X sobre una película fotográfica, donde aparece un patrón característico que manifiesta las separaciones que hay entre iones. Por ejemplo, si la longitud de onda de la superred dobla la de la red, el patrón de difracción de los rayos X mostrará puntos adicionales, a medio camino entre los puntos principales, procedentes de la red. (La intensidad de los puntos intermedios guarda relación con la magnitud de la deformación de la red.) Los primeros experimentos de este tipo fueron realizados por el grupo parisiense de Robert Comes, en los años setenta.

Como una ODS no da lugar ni a una fluctuación de carga ni a una distorsión de la red, resulta mucho más difícil detectarla. En principio, podría captarse mediante el microscopio de fuerza magnética, instrumento que responde a las variaciones del espín, pero estos dispositivos no han alcanzado todavía la sensibilidad precisa. La primera manifestación de ODS apareció mediante dispersión de neutrones por cromo. (Los neutrones, que tienen espín aunque carecen de carga, son útiles para el estudio de estructuras de espín ordenadas.) Además, los detectores indirectos del campo magnético, una resonancia magnética por ejemplo (la misma técnica diagnóstica de uso en los hospitales), son los únicos medios para detectar la presencia de ODS.

Los efectos de las ODC y de las ODS pueden también observarse mediante los movimientos que realizan, considerando tales ondas como un todo. Estos movimientos pueden diferir bastante a tenor de la relación que se dé entre la longitud de onda de la onda de densidad y el espaciado de la red subyacente. La longitud de onda de la ODC cambia con el número de electrones del sólido: si hay más electrones, la longitud de onda disminuye y puede, en particular, que no iguale nunca el espaciado original de los iones de la red. Cuando tal ocurre, decimos que la ODC es "inconmensurable" con el espaciado original de la red; vaga, sin ser afectada por la red, hasta que la atrapa un defecto. (Un defecto actúa como un pozo, o como una goma de mascar, en la superficie de potencial eléctrico donde la ODC queda atrapada.) Pero si la onda de densidad de carga y el espaciado original de la red son "conmensurables" y ajustan bien, acontece algo parecido a la situación en que cada estudiante está en un bache de la calle y resulta, por ende, muy difícil que la banda eche a andar. Por esta razón, revisten mayor interés las ondas inconmensurables, con la variedad de comportamientos que presentan. Las ondas conmensurables, las que originalmente imaginó Peierls, conservan un valor histórico.

Hay dos movimientos básicos globales que las ODC se permiten; reciben el nombre de modos colectivos. La mecánica cuántica nos permite pensar en ellos como partículas, y, en consecuencia, sus nombres terminan con el sufijo "on". El movimiento de las crestas adelante y atrás y su apilamiento ocasional constituyen

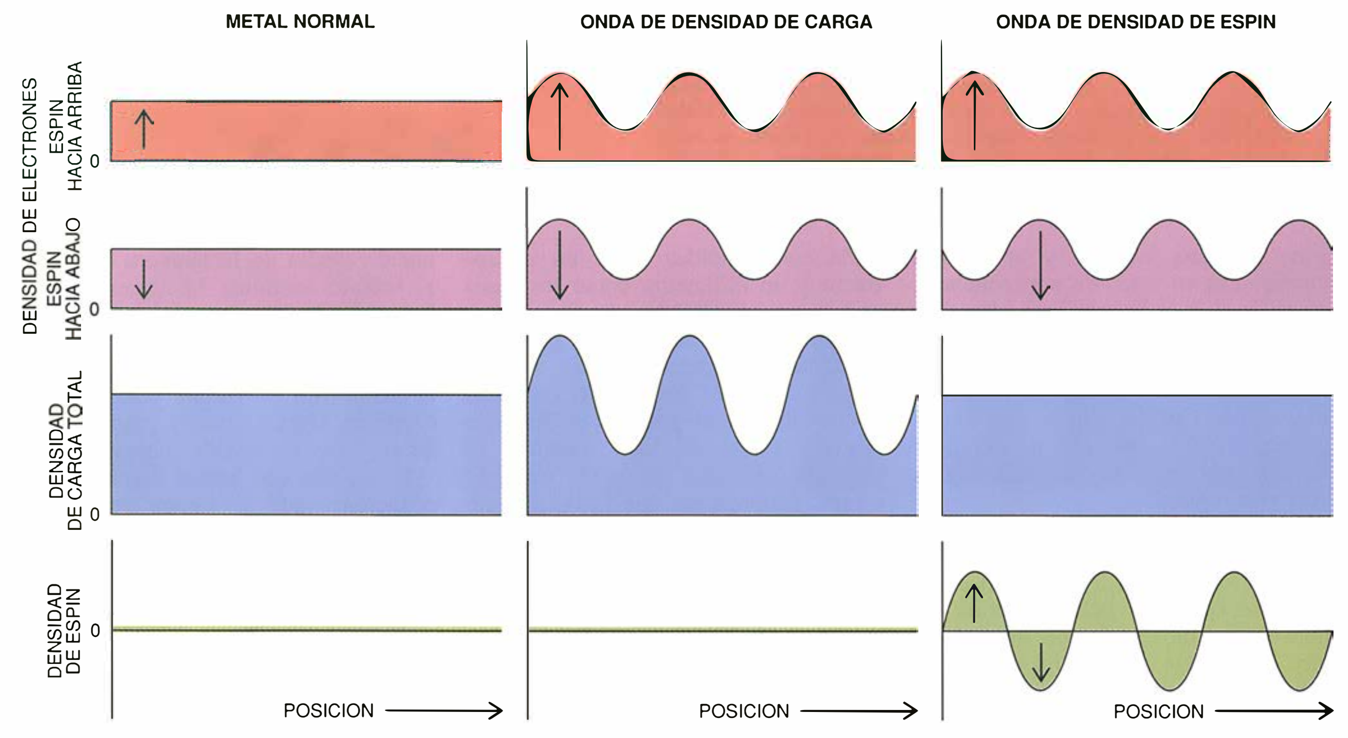
una clase de movimiento colectivo, el fasón (en él se cambia la "fase" de la onda de densidad). En el caso de ondas que no se ajusten bien a la estructura subyacente de la red, el movimiento no gasta energía (a menos que un defecto fije la onda), pero el apilamiento sí consume algo. La otra manera en que las ODC se modifican es que las crestas se hagan más altas. Este movimiento, un amplitudón, precisa bastante energía. Tanto la posición como la altura de las crestas pueden cambiar, de manera que las variaciones en distancias más cortas tienen energías mayores. Las energías de estos movimientos fueron calculadas por Patrick A. Lee, T. Morris Rice y Philip W. Anderson, de AT&T. Las ODS comparten estos movimientos colectivos con las ODC y poseen, además, un modo puramente magnético, que está relacionado con cambios en la orientación del espín. A estas excitaciones se les llama magnones.

Los movimientos espectaculares se producen cuando aplicamos un campo eléctrico a un sólido que contenga una ODC. En 1986, Nai-Phuan Ong, Pierre Monceau y Alan M. Portis, de la Universidad de California en Berkeley, encontraron en el triseleniuro de niobio una relación corriente-voltaje muy distinta de la ley de Ohm, en la que la conductividad es constante. Desde entonces, algunos materiales con ODC han presentado conductividades que varían en algunos órdenes de magnitud al aplicárseles campos eléctricos muy modestos (de menos de un volt por centímetro). Hoy sabemos que este cambio en la conductividad se debe a la onda de densidad, que se libera de los defectos y se mueve repentinamente toda ella. Más insólita resulta la variación de la corriente con el tiempo, aun cuando sólo se aplique un voltaje constante. Robert M. Fleming y Charles C. Grimes, de AT&T, observaron ese fenómeno. Las mediciones que hemos efectuado hace poco, las de Denis Jérome, Silvia Tomić y otros, de la Universidad de París Sur, y las del grupo de Takashi Sambongi, de la Universidad de Hokkaido, han demostrado que las ODS se comportan de manera muy parecida a las ODC en presencia de campos eléctricos.

El modelo más sencillo que describe el comportamiento de las ondas de densidad es el modelo de la partícula clásica. Fue propuesto por uno de nosotros (Grüner), junto con Alfred Zawadowski y Paul M. Chaikin, por entonces en la Universidad de California en Los Angeles (UCLA). La onda de densidad de carga se representa mediante una sola partícula con masa, a la que se coloca en el centro de masas de ésta. Su comportamiento refleja el de todo el conjunto. En ausencia de campos eléctricos externos, se acomoda la partícula sobre una superficie ondulada, como una canica en una de las cavidades de una huevera. Esta configuración describe una cresta de una ODC adherida a un defecto. Si movemos la ODC, la canica sube por el borde de su cavidad y cae en la siguiente, lo que significa que la siguiente cresta queda adherida al mismo defecto.

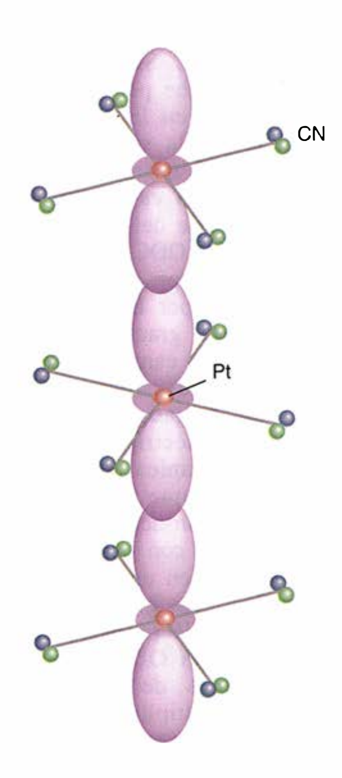
Con este modelo es posible comprender buena parte del versátil comportamiento de las ODC. La canica es libre de moverse por el fondo de la huevera y puede, por tanto, reajustar su posición, con gran sensibilidad, en respuesta a los campos eléctricos aplicados. Como la canica, es decir, la ODC, está cargada, su posición afecta al campo eléctrico del medio. Normalmente, la canica ajusta su posición de manera que se reduzca el campo eléctrico que actúa sobre ella. Así, los materiales con ondas de densidad de carga tienen una gran "constante dieléctrica", tan grande que cabe llamarles superdieléctricos. Nuestras medidas, tanto para ODC como para ODS, dan valores de la constante dieléctrica que multiplican un millón de veces la constante de los semiconductores corrientes.

¿Qué sucede si aplicamos un voltaje continuo? La huevera que contiene la canica se inclinará. Si la inclinación, es decir, el voltaje, es suficientemente grande, la canica saldrá de la cavidad y caerá por la huevera. La canica se frena cuando



2. DENSIDADES DE CARGA Y DE ESPIN de los electrones en los metales normales y en las ondas de densidad de carga y de espín. Las densidades de electrones de espín hacia arriba (*naranja*) y de espín hacia abajo (*púrpura*) varían con la posición en el interior del cristal. Sumadas, dan la densidad de carga total (*azul*); su diferencia, la de espín (*verde*).

Materiales de ondas de densidad



Hay dos tipos de materiales muy distintos, orgánicos e inorgánicos, que presentan ondas de densidad. A los inorgánicos les caracteriza el estar formados por cadenas de iones de metales de transición, como el platino. Dentro de un cristal, cada cadena se halla separada de sus vecinas. Los electrones se mueven libremente a lo largo de las cadenas, pero la gran separación que hay entre ellas impide el movimiento transversal, de manera que la conductividad eléctrica puede ser entre 10 y 1000 veces mayor en la dirección de la cadena que en la perpendicular a ella. Un compuesto de cadena lineal de tipo inorgánico es el $K_2Pt(CN)_4Br_{0,3}3H_2O$, o KCP, que aparece a la izquierda. Los lóbulos verticales (*violeta*) muestran electrones orbitales que se superponen a lo largo de la cadena. Algunos otros compuestos de cadenas lineales que tienen ondas de densidad de carga de las llamadas inconmensurables son los $NbSe_3$, $(TaSe_4)_2I$ y $K_{0,3}MoO_3$.

Los otros tipos de materiales con ondas de densidad de carga se forman a partir de moléculas orgánicas planas, como el tetrametiltetraselenfulvaleno, o TMTSF. Varias de estas moléculas se apilan unas sobre otras para constituir un cristal junto con iones de PF_6 implantados, según se ilustra a la derecha. Los electrones son libres de moverse arriba y abajo por la pila, pero no de una pila a la siguiente; así, la conductividad es, de nuevo, altamente anisótropa.

Estos materiales orgánicos revisten especial interés en el estudio de los electrones en los sólidos, por la sencilla razón de que podemos ajustar sus propiedades con gran precisión. Se puede crear una familia completa de sales basadas en TMTSF reemplazando el anión PF_6 por ReO_4, Br, SCN o AsF_6, entre otros. Cada nueva sal presenta intensidades de interacción entre los electrones ligeramente distintas; estas variaciones pueden tener profundos efectos. El cristal $(TMTSF)_2ClO_4$, enfriado lentamente hasta un kelvin, se convierte en superconductor; cuando el enfriamiento es rápido, da una onda de densidad de espín.

sube por una cavidad y se acelera cuando cae en otra. En consecuencia, su velocidad, y la corriente eléctrica, sube y baja con el tiempo. Estas oscilaciones de la corriente, que hemos mencionado antes, se observan muy bien. Cuanto mayor sea la inclinación de la huevera, es decir, el voltaje continuo, más elevada será la corriente media.

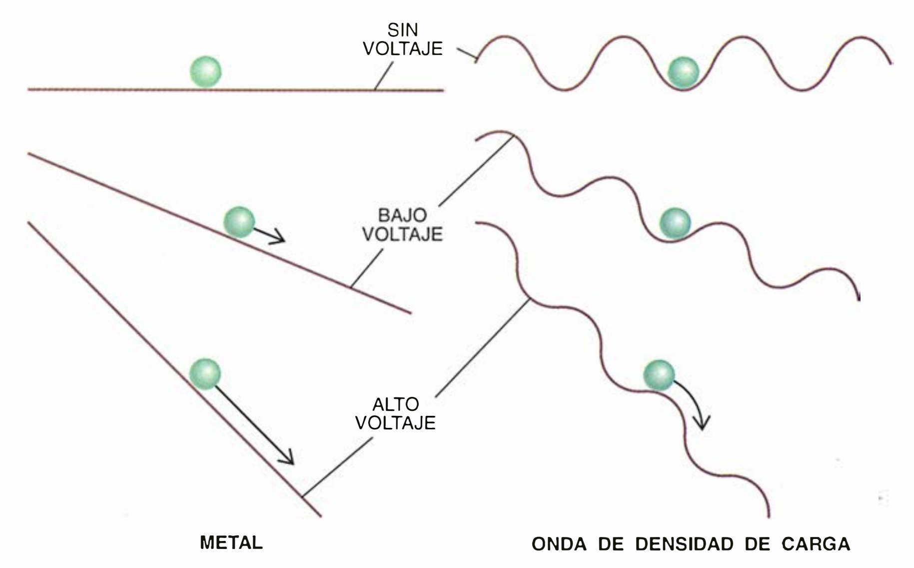
Supongamos ahora que, en vez de una diferencia de potencial constante, se aplica un voltaje alterno. La huevera se moverá como un columpio. La canica oscilará hacia delante y hacia atrás por su cavidad. Este movimiento global de la onda de densidad dispersa la luz de ciertos colores, lo que permite su detección en experimentos ópticos de longitudes de onda comprendidas entre un micrometro y un milímetro, como los realizados en la UCLA. (Inversamente, las ODC pueden detectar con precisión la radiación electromagnética.) Si aplicamos a la vez un campo continuo y otro alterno, el primero inclinará la huevera hacia un lado mientras el segundo hará que oscile de un lado a otro. Supongamos que la canica esté cayendo por la huevera. Si el tiempo que tarda la canica en ir de una cavidad a la siguiente es aproximadamente igual al período durante el cual el voltaje alterno ladea la huevera hacia "arriba", la bola botará de una cavidad a otra una vez por cada ciclo del potencial alterno. Cuando la canica salte huevera abajo ayudada por el campo alterno, la corriente no cambiará aunque se aumente la inclinación media de la huevera elevando el voltaje continuo. Si representamos la corriente en función del voltaje continuo (en presencia de un voltaje alterno), veremos que la corriente aumenta con el voltaje continuo excepto en ciertos tramos planos, donde se tiene un "modo inmovilizado".

El modelo que hemos descrito y las ecuaciones que se siguen de él para el movimiento de la canica resultan ser aplicables en situaciones dispares. Describen, por ejemplo, una unión Josephson (la que se da entre dos superconductores), el movimiento de los iones en sólidos, un péndulo en un campo gravitacional y ciertos circuitos electrónicos. Aunque las ecuaciones parecen sencillas, tienen una gran variedad de soluciones, incluyendo el comportamiento caótico.

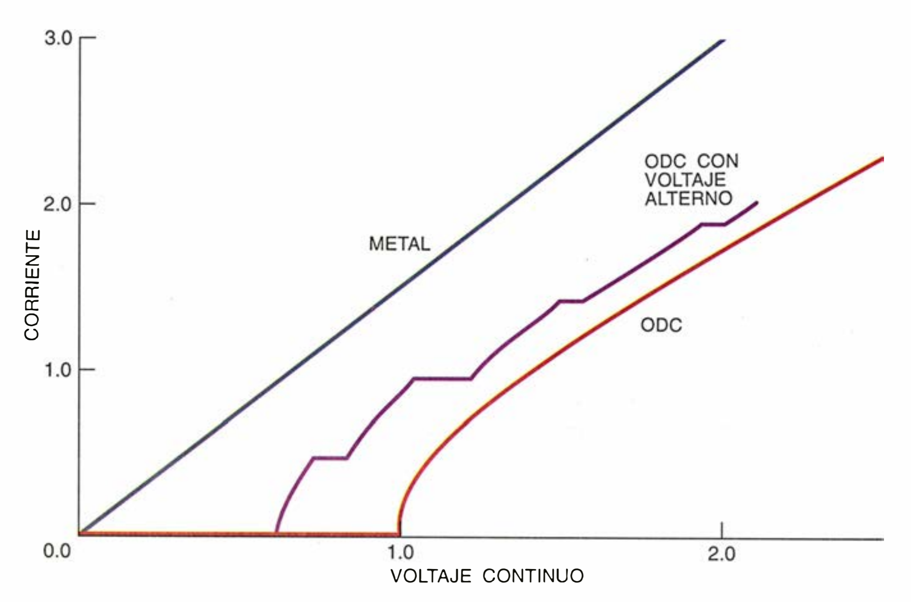
Otros comportamientos no son tan sencillos de entender. Nosotros hemos encontrado, enfriando materiales que contengan ODS hasta casi el cero absoluto, un fenómeno peculiar que se debe, conforme a la interpretación que se le ha dado, al paso de la canica a la siguiente cavidad por efecto túnel y no subiendo hasta el borde de su cavidad. Desde entonces, este efecto puramente mecánico-cuántico ha sido confirmado por otros grupos. El paso por efecto túnel fue predicho por Kazumi Maki y por John Bardeen pero es demasiado pronto para asegurar que su modelo se aplique a nuestros hallazgos experimentales relativos a ODS a bajas temperaturas.

Quizás el comportamiento más extraño de todos sea el de la auto-organización. Susan N. Coppersmith y Peter B. Littlewood, de AT&T, y Kurt A. Wiesenfeld y Per Bak, del Laboratorio Nacional de Brookhaven, dedujeron la existencia de este fenómeno a partir de experimentos con ODC realizados por investigadores de AT&T y por nosotros en UCLA. La auto-organización es un fenómeno que las ODC tienen en común con los terremotos. De la misma manera que dos placas tectónicas que se rozan entre sí quedan enganchadas por sus bordes rugosos y se sueltan repentinamente (con consecuencias catastróficas), las ondas de densidad de carga, en presencia de ciertos campos eléctricos, se quedan enganchadas en los defectos y de golpe se liberan. Pero la analogía es más profunda. Los terremotos y las ODC tienden a adoptar configuraciones en las que basta una pequeña perturbación para provocar un cambio violento: se auto-organizan en un estado crítico. La canica se sitúa sobre el filo que divide las dos cavidades de la huevera.

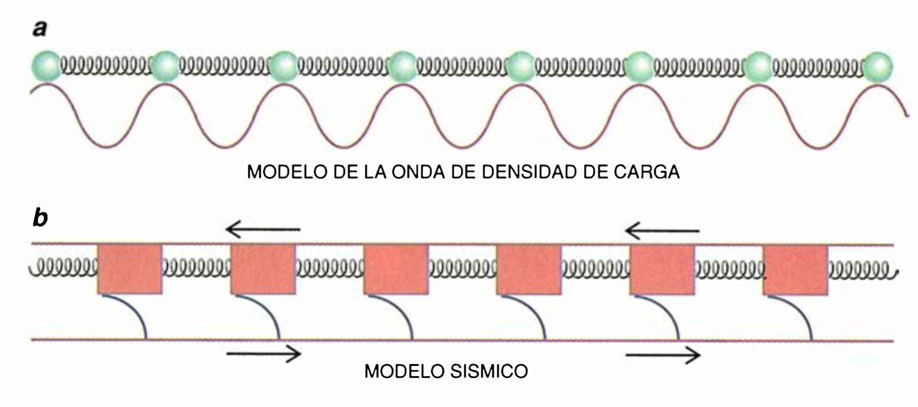
Para estudiar el comportamiento auto-organizado hemos de refinar nuestro modelo. La auto-organización se debe a las interacciones mutuas, de manera que nuestro modelo ha de incluir los tirones y empujones entre las distintas regiones de la ODC. Ya no es suficiente una canica en el centro de masas; ahora necesitamos una serie de canicas, unidas a sus vecinas con muelles. Esta disposición representa la elasticidad de la onda de densidad. Supongamos que conectamos repetidas veces un campo eléctrico constante durante cierto tiempo, y lo desconectamos. Las canicas se mueven determinada distancia mientras actúa el campo, y ruedan hacia los fondos de las cavidades cuando se desconecta. Cabría esperar que se desplazaran más lejos si el tiempo de conexión fuese mayor. Pero sucede algo bastante diferente, tal y como se observó en las simulaciones de Coppersmith. Inmediatamente antes de que se conecte el campo, las canicas se colocan en cavidades vecinas; en el momento en que es desconectado, cada una se encuentra en equilibrio justo en el borde entre dos cavidades, con independencia de cuánto tiempo se haya aplicado el campo. (Una vez se ha desconectado el campo, las canicas caen en una cavidad, algunas veces en la que está a su derecha y otras en la hondonada de la izquierda.) Este



3. EL MODELO DE LA PARTICULA CARGADA muestra cómo la corriente fluye en las ondas de densidad de carga de manera distinta que en los metales normales. En un metal (*izquierda*), la partícula yace sobre una superficie de potencial eléctrico plana. Si aplicamos un voltaje, la superficie se inclina y la partícula empieza a deslizarse: hay una corriente. En el caso de una onda de densidad de carga (*derecha*) la superficie es ondulada. Si el potencial aplicado es bajo, es decir, si la inclinación es pequeña, la partícula varía su posición sólo ligeramente, y no hay corriente. Si la inclinación adquiere magnitud suficiente para que la partícula supere la barrera, se desplazará hacia abajo por la superficie ondulada. En tal caso la corriente sube y baja con el tiempo a medida que la partícula va superando cada barrera.



4. CORRIENTE EN FUNCION DEL VOLTAJE, para los metales y para las ondas de densidad de carga. En un metal (*azul*), la corriente aumenta linealmente con el voltaje. En una onda de densidad de carga no hay corriente mientras el voltaje no alcance un valor crítico; sólo cuando lo haga empezará a fluir la corriente (*rojo*). Si además de un voltaje continuo aplicamos otro alterno, la curva presentará trozos planos (*púrpura*), que corresponden a un "modo inmovilizado" cuando el flujo de la onda de densidad de carga se ajusta a la frecuencia alternante.





5. COMPARACION DE LA AUTO-ORGANIZACION en modelos de ondas de densidad de carga y en fallas sísmicas. Las partículas conectadas con muelles representan la posición y la elasticidad de la onda de densidad de carga (*a*). Las partículas yacen sobre una superficie ondulada. Al conectar y desconectar repetidamente un campo eléctrico, las canicas se sitúan en la posición más inestable posible: cada una en la cumbre de una colina. En el modelo sísmico (*b*), los bloques están conectados a una superficie que se mueve lateralmente con respecto a la superficie inferior. Esta tiene cintas metálicas que se arrastran por los bloques, unidos a su vez por muelles. Después de algún tiempo arbitrario (impredecible), la tensión acumulada hace que los bloques reordenen sus posiciones de manera catastrófica. Pero las nuevas posiciones tornan a ser inestables. La fotografía muestra la falla de San Andrés, en los llanos californianos de Carrizo, al este de San Luis Obispo.

extraño comportamiento autorregulado es más fácil de estudiar en las ODC que en los terremotos, lo que las hace muy útiles para la comprobación de teorías dinámicas complejas.

Los estados de las ondas de densidad son probablemente las configuraciones periódicas de electrones más sencillas que podamos encontrar. Distintas teorías apuntan a una jerarquía de configuraciones más complejas. Una de esas indicaciones se debe a Eugene Wigner, que la enunció en 1939. Demostró que, si la densidad de los electrones fuese lo bastante baja —por ejemplo, en un conjunto de ellos que se movieran libremente en dos dimensiones—, se dispondrían según un patrón cristalino. Desde entonces, muchos han buscado "cristales de Wigner". A principios de los años ochenta, Grimes y Gregory Adams, de AT&T, demostraron que los electrones depositados sobre la superficie del helio líquido formaban un cristal así. Grupos de Saclay, AT&T y otros han obtenido pruebas de su presencia en sistemas de estado sólido.

Las propiedades de los materiales de ondas de densidad no han servido todavía para incrementar nuestro bienestar. Sin embargo, los planes al respecto abundan. Las constantes dieléctricas de los materiales con ODC cambian con el campo eléctrico; en los circuitos podrían hacer de condensadores sintonizables. La intensa respuesta de las ondas de densidad de carga a la radiación electromagnética las hace útiles como detectores de luz; a bajas temperaturas, la mecánica cuántica podría acabar por limitar esa sensibilidad. Bardeen, más conocido por la teoría de la superconductividad y la invención del transistor de estado sólido, elaboró la teoría cuántica del transporte de ondas de densidad. Está por ver si se pueden construir y utilizar los detectores cuánticos que vislumbró. Por el momento, bastante felices nos hace ya el ir sabiendo cada vez más de la naturaleza de las ondas de densidad de carga y de espín.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE DYNAMICS OF CHARGE-DENSITY WAVES. G. Grüner en *Reviews of Modern Physics*, vol. 60, n.º 4, páginas 1129-1181; 4 de octubre de 1988.

CHARGE DENSITY WAVES IN SOLIDS. Dirigido por L. P. Gor'kov y G. Grüner. Elsevier, 1990.

EVIDENCE ACCUMULATES, AT LAST, FOR THE WIGNER CRYSTAL. Anil Khurana en *Physics Today*, volumen 43, número 12, páginas 17-20; diciembre de 1990.

Representación visual de las operaciones mentales

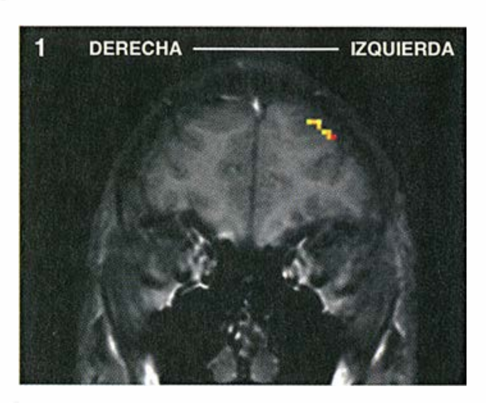
Las estrategias de la ciencia cognitiva y las técnicas de obtención de imágenes del cerebro nos asoman a los sistemas neurales que subyacen al pensamiento

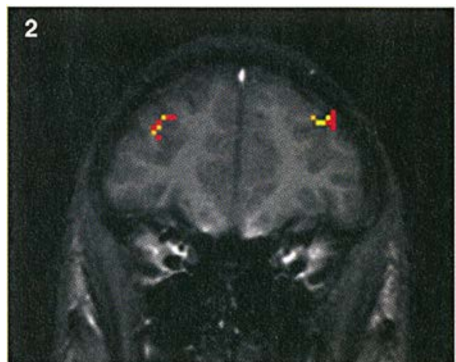
Marcus E. Raichle

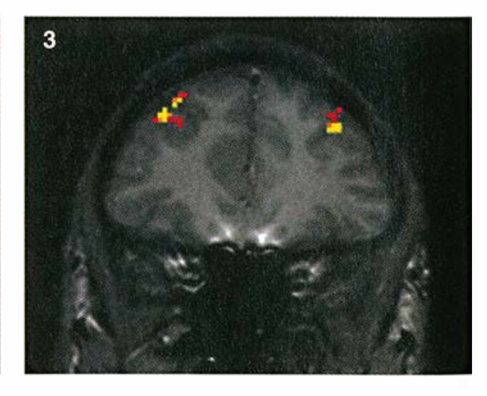
¿Por qué nos entristecen los infortunios de *Hamlet* o nos estremecen los sombríos augurios de Poe en *El Cuervo*? Leyendo esas obras maestras nuestros sentidos absorben unas sucesiones de caracteres impresos y las transmiten al cerebro, que las transforma en vivencias mentales y emociones intensas. Considerar como una "caja negra" el cerebro, sin embargo, deja sin identificar los procesos neurales específicos responsables de tales acciones de la mente. Durante siglos los filósofos han debatido las relaciones entre la mente y el cerebro, pero hasta hace muy poco no se ha logrado explorar de un modo analítico esta conexión, es decir, el interior de la caja negra. Para ello ha sido crucial el desarrollo tecnológico de la obtención de imágenes en los últimos años y, muy destacadamente, la tomografía por emisión de positrones (TEP) y la formación de imágenes por resonancia magnética (IRM). Utilizadas con potentes ordenadores, estas técnicas permiten captar en tiempo real imágenes de los cambios fisiológicos asociados a los procesos mentales. Es posible ver cómo "se encienden" determinadas regiones del cerebro al realizar actividades de lectura, por ejemplo, y de qué forma se organizan y coordinan sus tareas las neuronas con su complejo repertorio de células auxiliares. La cartografía del pensamiento puede además servir de instrumento a la neurocirugía y aclarar las diferencias neurales que presentan los pacientes afectados por enfermedades mentales.

He de señalar de entrada que las hipótesis en las que se basa la cartografía cerebral son distintas de las adoptadas por los frenólogos. Estos postulaban que había regiones cerebrales acotadas, a menudo identificadas por protuberancias del cráneo, que representaban pensamientos y emociones concretas. Por el contrario, ahora se sostiene que son redes de neuronas residentes en zonas estrictamente localizadas las que realizan los procesos involucrados en el pensamiento. Del mismo modo que los miembros de una orquesta conjugan sus actuaciones para interpretar una sinfonía, ciertas partes muy concretas del cerebro, responsables de operaciones elementales, trabajan conjun-

1. LAS ZONAS NEURALES ACTIVAS de un sujeto que recuerda una sucesión de letras se cartografían mediante imágenes por resonancia magnética. Se representan aquí seis cortes de la corteza frontal, identificados por números que corresponden a los de la fotografía de la izquierda. Los colores rojo, naranja y amarillo representan áreas de actividad creciente. (Imágenes obtenidas por Jonathan D. Cohen y sus colegas de las universidades de Pittsburgh y Carnegie Mellon.)







tamente y producen como resultado un comportamiento humano observable. El fundamento de estos análisis es la posibilidad de descomponer una conducta compleja en una serie de operaciones mentales constitutivas. Para leer, por ejemplo, tendremos que reconocer que una sarta de letras forma una palabra, distinguir después el significado de las palabras, frases u oraciones, y, finalmente, crear las imágenes mentales que correspondan.

El reto estriba en determinar qué partes del cerebro se hallan activas y cuáles en reposo durante la ejecución de las tareas. En el pasado, para acercarse a las funciones del cerebro los neurólogos se apoyaban en estudios de laboratorio sobre animales y personas afectados por lesiones cerebrales localizadas. Ahora, sin embargo, las técnicas de formación de imágenes nos permiten representar con toda seguridad la anatomía y operación del cerebro humano normal.

La era de la formación de imágenes en medicina se inició a comienzos de la década de los setenta, cuando se generalizó la tomografía computerizada por rayos X, hoy llamada TC por rayos X o simplemente TC. Sus principios fueron desarrollados, de forma independiente, por Allan M. Cormack y Sir Godfrey Hounsfield, galardonados con el Nobel en 1979.

MARCUS E. RAICHLE enseña radiología y neurobiología en la facultad de medicina de la Universidad de Washington en Saint Louis. Comenzó a investigar el metabolismo y la circulación cerebral en su etapa de residente en el Hospital Cornell.

La tomografía computerizada se aprovecha de que los distintos tejidos absorben diferentes cantidades de energía de rayos X. Cuanto más denso es el tejido, tanto más absorbe. Por ello, un haz de rayos X muy concentrado que atraviese el cuerpo emergerá del mismo a un nivel reducido que dependerá de los tejidos y órganos encontrados a su paso. Si se dirigen a través del cuerpo haces de rayos X que formen muy distintos ángulos con un plano, se recogerá información suficiente para reconstruir una imagen de la sección del cuerpo. Fue esencial en el desarrollo de la TC la aparición de técnicas matemáticas e informáticas mucho más refinadas que permitieron procesar la ingente cantidad de información necesaria para crear las propias imágenes. Sin ordenadores avanzados, la tarea hubiese sido imposible de acometer.

Dos consecuencias tuvo la TC por rayos X. En primer lugar, cambió definitivamente una práctica de la medicina al aventajar en mucho a la tradicional exploración con rayos X. En efecto, con la TC podían verse tejidos humanos vivos como los del cerebro sin molestar al paciente, mientras que los rayos X normales solamente revelaban los huesos y algunos tejidos blandos circundantes. En segundo lugar, científicos e ingenieros recibieron un fuerte estímulo para estudiar otras maneras de representar el interior del cuerpo valiéndose de similares métodos matemáticos e informáticos para la formación de las imágenes.

Uno de los primeros grupos que se interesaron por las posibilidades que ofrecía la tomografía computerizada fueron los expertos en autorradiografía de tejidos. Este método, utilizado por la fisiología en metabolismo y circulación de la sangre, consistía en inyectar en una vena un compuesto marcado radiactivamente. Una vez que el compuesto se había acumulado en el órgano a examinar (por ejemplo, el cerebro) se sacrificaba el animal y se le extraía dicho órgano, seccionándolo cuidadosamente para depositar uno por uno los cortes en un trozo de película sensible a la radiactividad. Muy similarmente a la impresión fotográfica de una escena de la vida real, la película de rayos X registra la distribución del compuesto radiactivo en cada corte.

Al revelar la película de rayos X, se obtiene una imagen de la distribución de radiactividad dentro del órgano, y de ella pueden deducirse las funciones específicas del mismo. El tipo de información vendrá determinado por el compuesto radiactivo que se inyecte. Así, un tipo de glucosa con trazador radiactivo servirá para medir el metabolismo del cerebro, ya que la glucosa es la fuente principal de energía de las neuronas. Este método autorradiográfico, hoy muy difundido, lo introdujo en 1977 Louis Sokoloff.

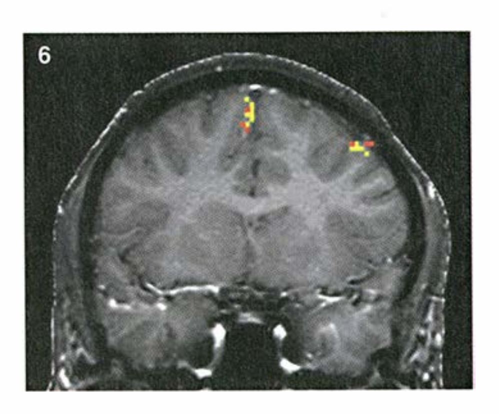
Los adeptos a la autorradiografía de tejidos se quedaron fascinados cuando apareció la TC. En un momento comprendieron que, si podía reconstruirse la anatomía de un órgano haciendo pasar a través de él un haz de rayos X, también podría reconstruirse la distribución de un radioisótopo previamente administrado. Para ello bastaba medir la emisión de radiactividad desde la sección del cuerpo implicada. De esta percepción nació la idea de autorradiografiar en vivo sujetos humanos.

En la evolución de la autorradiografía humana tuvo gran importancia la elección de radioisótopo. Los expertos seleccionaron una clase de radioisótopos que emiten positrones, partículas semejantes a los electrones, pero con carga positiva. Un positrón se combina casi inmediatamente con un electrón próximo, con lo cual se aniquilan mutuamente y emiten en el proceso dos rayos gamma. Al propagarse estos rayos en direcciones casi opuestas, pueden ser detectados por los dispositivos situados alrededor de la muestra, los cuales localizarán su origen. El papel crucial de los positrones en autorradiografía de seres humanos dio origen a la tomografía por emisión de positrones, o TEP.

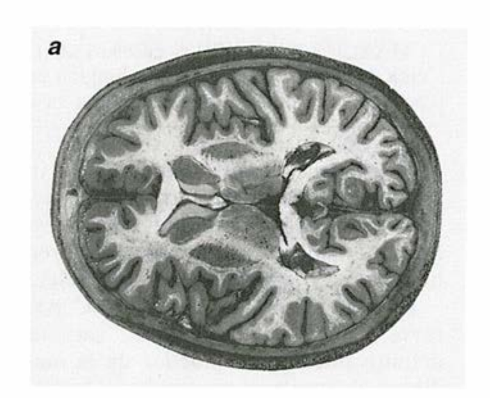
A caballo entre los años setenta y los ochenta, cobraron un rápido desarrollo los instrumentos TEP para la medición de diversas actividades del cerebro, tales como el metabolismo de la glucosa, el consumo de oxígeno, el riego

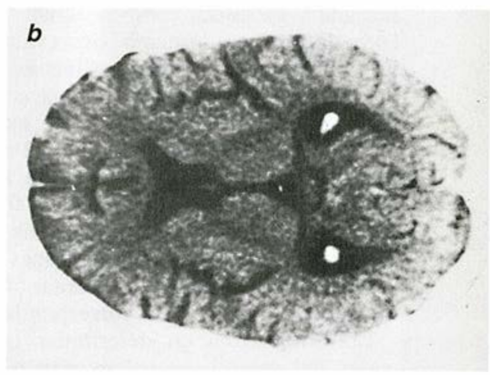






2. SECCION DEL CEREBRO (*a*), comparada con las correspondientes imágenes del corte obtenidas mediante tomografía computerizada por rayos X (TC) (*b*), tomografía por emisión de positrones (TEP) (*c*) y resonancia magnética (IRM) (*d*). La TC presenta la estructura de la sección cerebral, mientras que la TEP muestra la cuantía del trabajo neuronal (a mayor actividad, zona más oscura). Convenientemente ajustada, la IRM puede realizar ambas tareas: aquí ofrece una imagen de la estructura.



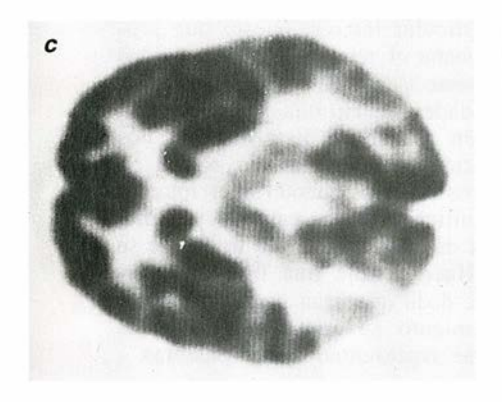


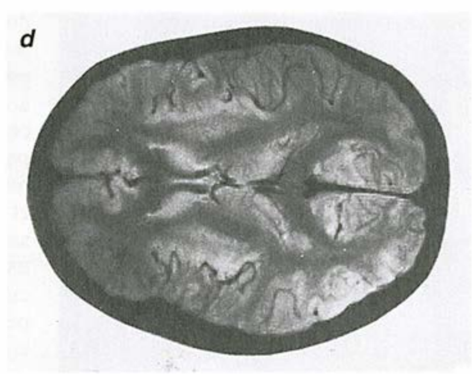
sanguíneo y la interacción con los fármacos. De todas estas variables, el flujo sanguíneo ha demostrado ser el indicador más fiable de la función cerebral en cada momento.

La idea de que la circulación local de la sangre está íntimamente vinculada a la actividad cerebral viene de antiguo. Charles S. Roy y Charles S. Sherrington la presentaron formalmente en una publicación de 1890, en la que sugerían que un "mecanismo automático" regulaba la aportación de sangre al cerebro. Y si bien los experimentos posteriores han confirmado la existencia de tal mecanismo, nadie conoce su naturaleza exacta, lo que constituye un evidente reto para los investigadores.

La TEP mide el flujo sanguíneo

3. LAS EXPLORACIONES POR TEP exponen las áreas neurales activas. En la primera columna de la izquierda se presenta el cerebro por su lado izquierdo. Las restantes columnas muestran sucesivamente cinco cortes horizontales (en la figura, el lado derecho mira a la derecha y el frente hacia arriba). Cada fila ilustra la diferencia entre una determinada tarea y el estado de control (contemplar un punto en un monitor de televisión). Cuando se ven nombres de manera pasiva (*a*), la corteza visual primaria se excita. Cuando se escuchan nombres (*b*), el control pasa a los lóbulos temporales. La pronunciación de nombres menos la percepción visual o auditiva de los mismos (*c*) revela las áreas motoras involucradas en el habla. La generación de verbos (*d*) pone en juego nuevas zonas neurales, incluyendo las de los lóbulos frontal y temporal izquierdos que aproximadamente coinciden con las áreas de Broca y Wernicke.





en un cerebro humano normal aplicando con las necesarias adaptaciones una técnica de autorradiografía que el grupo de Seymour S. Kety desarrolló a finales de los años cuarenta para examen de animales en laboratorio. Esta técnica utiliza agua radiactivamente marcada —hidrógeno combinado con oxígeno 15, isótopo radiactivo del oxígeno—, la cual emite un copioso número de positrones a medida que se desintegra (no es posible utilizar isótopos del hidrógeno porque ninguno de ellos emite positrones). El agua marcada se inyecta en una vena del brazo; al cabo de un minuto se acumula ya en el cerebro, formando así una imagen del flujo sanguíneo.

La radiactividad del agua no tiene ningún efecto letal, ya que la vida media del oxígeno 15 es de dos minutos sólo. La muestra se desintegra casi por completo en unos diez minutos (cinco veces la vida media) y pasa a una forma no radiactiva. Tal rapidez de desintegración reduce sustancialmente la exposición de los sujetos a los riesgos que comporta la radiación; además, sólo se requieren dosis muy bajas del marcador radiactivo.

La veloz desintegración y las mínimas cantidades utilizadas permiten efectuar numerosas mediciones del flujo sanguíneo en un solo experimento. De este modo, la TEP puede obtener múltiples imágenes del cerebro en operación. Cada imagen es como una instantánea que capta la actividad del cerebro en ese momento. Los sistemas de TEP habituales localizan cambios de actividad con precisión milimétrica.

En los diez últimos años se ha impuesto una estrategia bien diferenciada para cartografiar la actividad neuronal mediante TEP. Consiste en el desarrollo de una idea que ya aplicó a la psicología Franciscus C. Donders en 1868. Según Donders, los procesos mentales podían medirse aplicando una lógica sencilla. El tiempo necesario para acusar la presencia de una luz (oprimiendo un pulsador, por ejemplo) se restaba del tiempo necesario para responder a un determinado color de luz, y la diferencia —unos 50 milisegundos— era el tiempo requerido para distinguir el color. Donders consiguió así aislar y medir un primer proceso mental.

En su enfoque actual, la TEP lleva a cabo una sustracción similar, pero referida a las zonas del cerebro donde se materializa el proceso mental. Se toman imágenes del flujo sanguíneo antes de iniciar una tarea y se comparan con las obtenidas cuando el cerebro está ocupado en dicho trabajo. Llamamos estado de control y estado de tarea a estos dos períodos, y se escoge cuidadosamente cada uno de ellos con el fin de separar lo mejor posible un limitado número de operaciones mentales. Al sustraer las mediciones del flujo sanguíneo tomadas en el estado de control de las obtenidas en cada estado de tarea, se identifican las partes del cerebro que entran en actividad para las diferentes tareas implicadas.

Para conseguir datos fiables, se toma el valor promedio de las respuestas obtenidas de muchos individuos o de muchas pruebas realizadas sobre la misma persona. Esta promediación permite detectar cambios en el flujo sanguíneo vinculados a la actividad mental, que de otro modo se confundirían fácilmente con alteraciones parásitas ambientales.

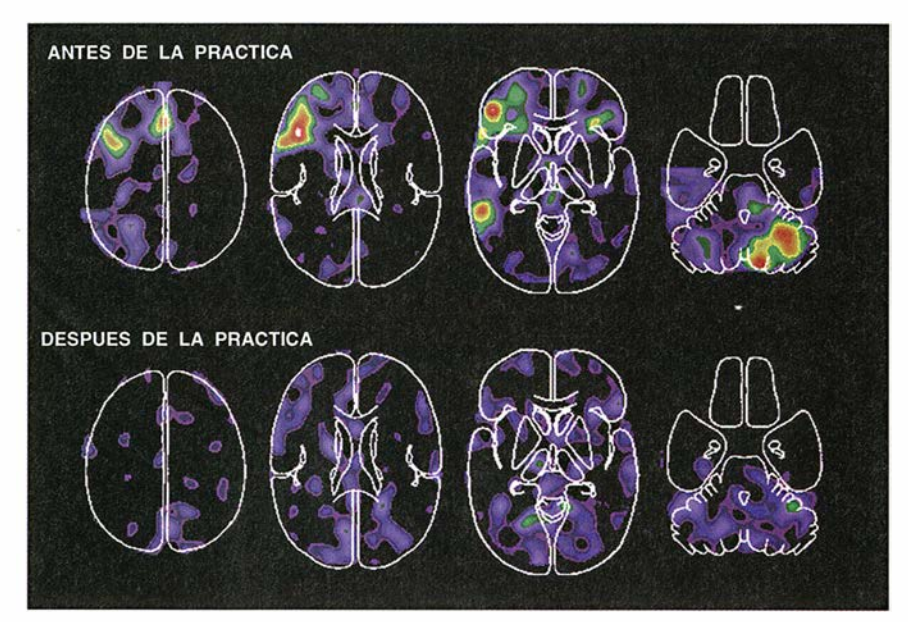
Una de las primeras aplicaciones en que ha demostrado su utilidad la cartografía del flujo sanguíneo por TEP es el estudio del lenguaje. Desde hace más de un siglo se viene investigando sobre la forma en que el cerebro adquiere y sistematiza habilidades lingüísticas. Los trabajos se iniciaron en 1861, cuando Pierre Paul Broca describió un paciente que había perdido el habla de resultas de una lesión en el lóbulo frontal izquierdo. (Todavía hoy, se dice que sufren afasia de Broca los pacientes con lesión en el lóbulo frontal y dificultades en el habla.) Los estudios de Broca sobre localización del lenguaje fueron complementados por Carl Wernicke. Este neurólogo informó en 1874 de la existencia de personas con dificultades de comprensión del lenguaje, las cuales presentaban lesiones en el lóbulo temporal izquierdo, la región ahora llamada área de Wernicke. Con esas premisas surgió determinada idea de la organización del lenguaje en el cerebro humano: la información fluye de las zonas receptoras visuales y auditivas a las áreas del lóbulo temporal izquierdo donde ha de ser comprendida, y desde ahí hacia las áreas frontales de producción del habla.

Toda la información anterior fue extraída de pacientes con el cerebro lesionado. ¿Es posible inferir de ello cómo se organiza el lenguaje en un cerebro sano? En 1988, Steven E. Petersen, Michael I. Posner, Peter T. Fox y Mark A. Mintun y yo iniciamos un programa de trabajo para responder precisamente a esa pregunta. El primer paso se basaba en el análisis por TEP de una tarea aparentemente sencilla: decir un verbo apropiado en respuesta a un nombre común. Por ejemplo, al oír o ver la palabra "vaso" el sujeto podría dar como respuesta "beber".

Elegimos esta aplicación porque admitía la subdivisión en múltiples componentes, y cada uno de ellos podía analizarse por separado mediante una cuidadosa selección de tareas. Los elementos que se distinguían con más facilidad eran los de la percepción visual y auditiva, la organización y ejecución de la expresión de palabras (el habla), y los procesos por los cuales el cerebro extrae significados de las palabras. (Cada una de estas operaciones admite la división en otras más elementales.)

Con el fin de identificar las áreas del cerebro involucradas en una operación concreta, establecimos cuatro niveles de procesamiento de la información. Esta jerarquía se ha convertido en norma entre los laboratorios dedicados a este tipo de investigaciones. En el primer nivel, se pedía a los sujetos de la prueba que mirasen fijamente una diminuta cruz en el centro de un monitor de televisión, al tiempo que un explorador de TEP medía el flujo sanguíneo en el cerebro. Se obtenía así una instantánea de la actividad mental.

En el segundo nivel, los mismos individuos siguieron con la vista fija en la cruz, pero durante la exploración fueron sometidos a la percepción de nombres comunes. Nombres que se leían bajo la cruz del monitor de televisión o bien se escuchaban a través de auriculares, realizándose exploraciones separadas para las percepcio-



4. CAMBIOS INDUCIDOS POR EL APRENDIZAJE en la actividad neural, revelados por las imágenes TEP. La fila superior muestra el cerebro de un sujeto obligado a generar con rapidez verbos al percibir nombres visualmente. La inferior presenta el resultado de 15 minutos de práctica: se activan regiones similares a las que intervienen en la simple lectura en voz alta.

nes visuales y auditivas. Al pasar al tercer nivel, se pidió a estos sujetos que pronunciaran la palabra que leían u oían. En el cuarto nivel, por último, tenían que decir en voz alta un verbo apropiado para ese nombre.

Al restar el primer nivel del segundo nivel, se aislaban aquellas zonas del cerebro implicadas en la percepción visual y auditiva de palabras. El resultado de sustraer del tercer nivel el segundo señalaba las partes del cerebro involucradas en la producción del habla. Por último, el nivel tercero restado del nivel cuarto localizaba las regiones que intervienen en la selección de un verbo adecuado al nombre percibido.

La última sustracción (generar verbos menos pronunciar nombres) era de particular interés, puesto que proporcionaba el retrato de una actividad puramente mental, descargada ya de las actividades de entrada y salida (percepción y habla). Esta imagen nos permitió visualizar lo que ocurre en nuestros cerebros cuando interpretamos el significado de las palabras y expresamos dicho significado a través de su uso. Hace visible una función consciente, dado que gran parte de nuestro pensamiento se apoya en conceptos e ideas representados por palabras.

El estudio anterior pone de manifiesto de qué manera la formación de imágenes del cerebro puede relacionar las operaciones mentales implicadas en una tarea del comportamiento con las redes específicas de áreas cerebrales que se conjugan, como una verdadera orquesta, para cada una de esas operaciones. De acuerdo con lo ya adelantado por los neurólogos, la tarea, tan sencilla en apariencia, de generar un verbo en respuesta a un nombre percibido no la realiza una sola parte del cerebro sino muchas áreas distintas que se organizan en redes. La percepción de palabras visualizadas tiene lugar en una red de áreas situadas en la parte posterior del cerebro, donde residen numerosos componentes del sistema visual. En cambio, la percepción de palabras presentadas por vía auditiva se produce en una red de áreas distinta: los lóbulos temporales.

Presumiblemente, la producción del habla —es decir, la simple repetición en voz alta de los nombres percibidos— pone en juego áreas motoras del cerebro. Las áreas de Broca y de Wernicke no parece que intervengan habitualmente en este tipo de generación de habla, actividad que muchos consideran en gran parte automática para la mayoría de los sujetos que utilizan con fluidez su lengua nativa. Este hallazgo viene a confirmar algo que quizás habíamos sospechado: a veces hablamos sin ser conscientes de lo que decimos.

Las regiones de los lóbulos frontal y temporal izquierdos (que en general corresponden a las posiciones respectivas de las áreas de Broca y de Wernicke) sólo entran en actividad cuando se añaden dos tareas: la evaluación consciente del significado de la palabra y la elección de una respuesta apropiada. En tales circunstancias, intervienen otras dos áreas más, con lo que se forma una red de cuatro regiones cerebrales. Pero importa señalar que entonces se desactivan dos zonas utilizadas en la repetición rutinaria de palabras. Esto sugiere que la demanda de generar

5. SUSTRACCION Y PROMEDIACION en la preparación de imágenes funcionales del cerebro. Al sustraer la configuración, en TEP, del flujo sanguíneo de un estado de control de la asociada a un estado de tarea se obtiene una imagen diferencia (*fila superior*). Los datos procedentes de diferentes sujetos se promedian (*en las dos filas inferiores*) para eliminar fluctuaciones estadísticas.

un verbo en respuesta a un nombre percibido no es una simple extensión de la tarea de pronunciar el nombre. Por el contrario, ambas tareas difieren en lo que atañe al cerebro.

Este descubrimiento nos movió a investigar qué sucedería si dejáramos a los sujetos ejercitarse en la tarea de generar verbos. Aunque al principio les resultó difícil la rápida formación de verbos —los nombres se presentaban cada 1,5 segundos—, al cabo de 15 minutos de práctica llegaron a relajarse y adquirir soltura. El examen posterior del cerebro revela que el entrenamiento ha cambiado por completo los circuitos neurales puestos en juego: los circuitos responsables de la repetición de nombres son los que ahora generan los verbos. Así pues, la práctica no solamente perfecciona —cosa harto sabida—, sino que también modifica la manera en que se organiza nuestro cerebro, y esto tal vez no haya sabido apreciarse enteramente.

Tras haberse demostrado la utilidad de la TEP en la neurología cognitiva, apareció otro método, capaz de rivalizar con dicha técnica. La formación de imágenes por resonancia magnética (IRM) se ha convertido hoy en un instrumento bastante común para diagnosticar lesiones en tejidos. Los avances recientes han aumentado enormemente la velocidad de formación de imágenes en IRM, que es por ello muy adecuada para investigaciones neurocognitivas.

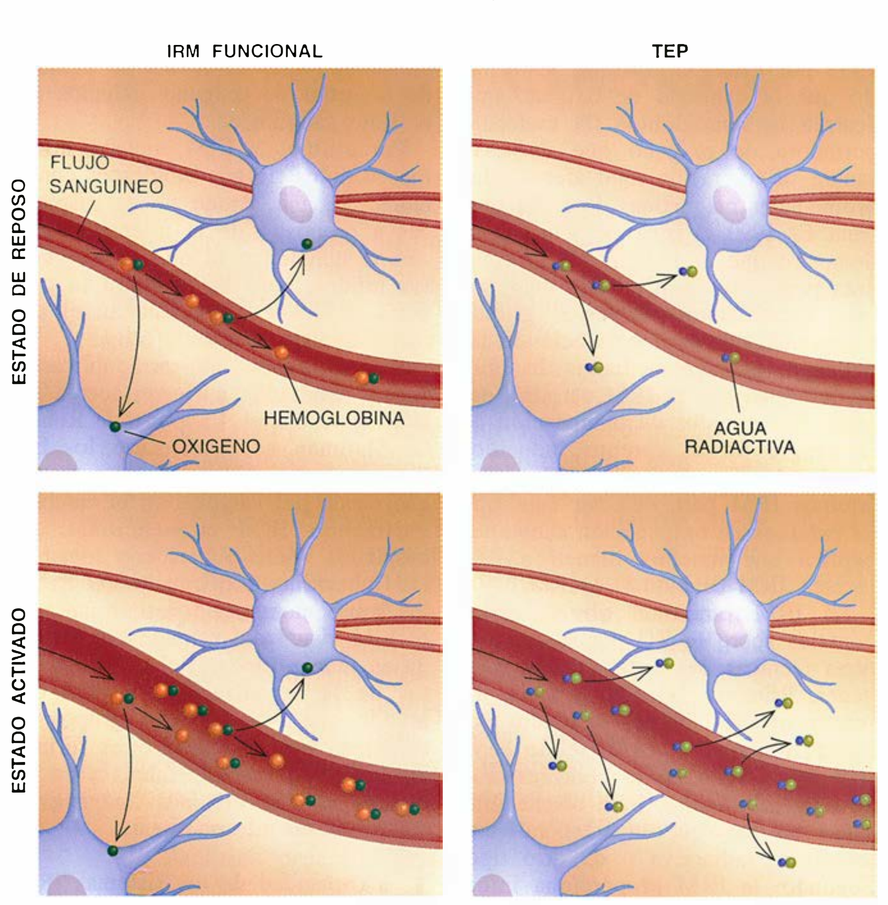
La IRM tiene su origen en una eficaz técnica de laboratorio denominada resonancia magnética nuclear (RMN), diseñada con el fin de explorar las características químicas de las moléculas. Por tal invención obtuvieron el premio Nobel en 1952 Felix Bloch y Edward M. Purcell. La RMN se basa en que muchos átomos se comportan como diminutas agujas imantadas en presencia de un campo magnético. Por tanto, es posible alinear tales átomos mediante una adecuada manipulación del campo magnético. En estas condiciones, la aplicación de impulsos de una onda radioeléctrica a una muestra perturba los átomos de una manera muy precisa, y éstos en consecuencia emiten señales de radio detectables que identifican el número y estado de los átomos pertenecientes a la muestra. El ajuste del campo magnético y de los impulsos de onda radioeléctrica proporciona información sobre la muestra en estudio.

La RMN saltó del laboratorio a la clínica cuando Paul C. Lauterbur descubrió que podían formarse imágenes por RMN mediante la detección de protones. La utilidad de estas partículas, abundantes en el cuerpo humano, reside en su gran sensibilidad a los campos magnéticos que las hace comportarse como minúsculas agujas imantadas. Se obtuvieron excelentes imágenes anatómicas con detalle muy superior a las conseguidas por TC de rayos X. Dado que la palabra "nuclear" comportaba cierto matiz de riesgo, la RMN pronto pasó a llamarse formación de imágenes por resonancia magnética (IRM).

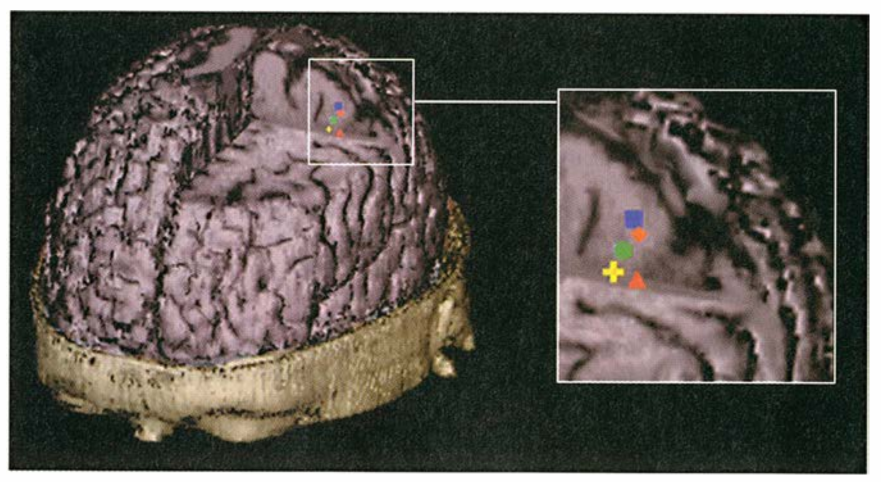
El interés por aplicar la IRM a la obtención de imágenes cerebrales se debe a que esta técnica es capaz de detectar una señal inaccesible a las exploraciones por TEP: concretamente, el aumento de oxígeno que se produce en una zona donde se ha intensificado la actividad neuronal. Y esta capacidad se basa en la manera de utilizar el oxígeno las neuronas. La TEP había revelado que los aumentos del flujo sanguíneo inducidos funcionalmente iban acompañados de alteraciones en la cantidad de glucosa consumida por el cerebro, mas no en la cantidad de oxígeno que éste gastaba. En efecto, ante bruscos incrementos de actividad neuronal el cerebro humano normal recurre al metabolismo anaeróbico. Pocos hubieran sospechado que el cerebro se apoyara en tácticas similares a las que utiliza la musculatura de un corredor, y el caso es que este metabolismo se produce a pesar de la abundancia de oxígeno que existe en un cerebro normal. Este misterioso comportamiento del cerebro merece un detenido análisis.

Un aumento en la afluencia de sangre hacia el cerebro que no vaya acompañado de un mayor consumo de oxígeno hará crecer la concentración del mismo en los capilares que drenan los centros neurales activos. En efecto, ha aumentado el suministro pero no así la demanda de oxígeno. Por consiguiente, el exceso de oxígeno entregado a la parte activa del cerebro vuelve sencillamente a la circulación general a través de las vasos de drenaje.

¿Por qué desempeña un papel



6. EL FLUJO SANGUINEO en el cerebro proporciona las señales que detectan la IRM funcional y la TEP. Cuando las neuronas en reposo (*arriba*) se activan (*abajo*), aumenta la afluencia de sangre hacia ellas. La IRM (*izquierda*) detecta cambios en los niveles de oxígeno, que crecen en los vasos sanguíneos próximos, debido a que las neuronas en actividad no consumen más oxígeno que cuando están en reposo. La TEP (*derecha*) se basa en un mayor aporte de agua radiactiva inyectada, que se difunde fuera de los vasos hacia todas las partes del cerebro.





7. LA MAGNETOENCEFALOGRAFIA (MEG) capta actividades neurales demasiado breves para poder ser detectadas por TEP o IRM. Mediante MEG se han localizado las zonas de la corteza somatosensorial de un adulto normal asociadas con los dedos de la mano derecha (*símbolos en color*). En la imagen IRM del cerebro se han situado símbolos que indican los dedos correspondientes.

esencial el oxígeno en los estudios por IRM del cerebro? La respuesta la da un descubrimiento efectuado en 1935 por Linus C. Pauling. Este halló que la cantidad de oxígeno que acarrea la hemoglobina (la molécula portadora de oxígeno que da a la sangre su coloración roja) afecta a las propiedades magnéticas de dicha proteína. En 1990, el grupo de Seiji Ogawa demostró que la IRM podía detectar esas pequeñas fluctuaciones magnéticas. Inmediatamente varios grupos comprendieron la importancia de tal hallazgo, y hacia mediados de 1991 se demostró que la IRM permitía detectar los cambios de oxigenación de la sangre en el cerebro inducidos funcionalmente. La capacidad de los equipos IRM para detectar este tipo de cambios de oxigenación sanguínea explica que muchos llamen a esta técnica IRM funcional, o IRMf.

La IRM funcional ofrece varias ventajas sobre la TC por rayos X y otras técnicas de confección de imágenes. Primero: la señal procede directamente de cambios inducidos por causas funcionales en el tejido cerebral (el cambio en la concentración de oxígeno venoso). Para obtener una señal no hay que inyectar ninguna sustancia, radiactiva o de otro tipo. Segundo: la IRM proporciona información anatómica y funcional sobre cada sujeto, lo cual permite una identificación estructural exacta de las regiones activas. Tercero: la resolución espacial es bastante buena, distinguiéndose partes de uno a dos milímetros solamente (lo cual mejora la resolución de la TEP). Cuarto: adecuadamente equipada (es decir, con capacidad ecoplanar), puede observar en tiempo real el ritmo de cambio de la señal de oxígeno inducida en el flujo sanguíneo.

Por último, la IRM encierra mínimos o nulos riesgos biológicos conocidos. Se han alzado voces suspicaces a propósito de la intensidad del campo magnético al que se exponen los tejidos, pero hasta ahora la mayoría de los estudios abonan el carácter benigno de los efectos.

En el pasado año se publicaron varios resultados curiosos acerca de la IRM funcional. El grupo de Robert G. Shulman ha confirmado los hallazgos de la TEP relativos a la organización del lenguaje en el cerebro. Utilizando IRM convencional, en hospitales, Walter Schneider y Jonathan D. Cohen han confirmado los trabajos sobre monos que descubrían una corteza visual del primate estructurada en mapas topográficos, reflejo éstos de la organización espacial del mundo que vemos. Otros grupos se esfuerzan por visualizar otras formas de actividad mental, tales como la manera en que creamos imágenes y recuerdos en nuestra mente.

La capacidad de los sistemas IRM para observar en tiempo real la señal del oxígeno ha sugerido la posibilidad de medir el tiempo que necesitan las diferentes zonas del cerebro para intercambiar información. Conceptualmente, una red de zonas del cerebro podría compararse a un grupo de individuos que mantienen una comunicación en conferencia. La información temporal buscada equivaldría a conocer quién tenía el uso de la palabra y, posiblemente, quién era el responsable. Tal información sería esencial para comprender cómo se coordinan en red determinadas zonas del cerebro produciendo un comportamiento.

El obstáculo, sin embargo, surge de la gran diferencia de velocidades entre la actividad neuronal y el ritmo de variación de los niveles de oxigenación. Las señales viajan de una parte a otra del cerebro en 0,01 segundos o menos, pero por desgracia los cambios de flujo sanguíneo y oxigenación de la sangre son mucho más lentos y ocurren desde décimas de segundo hasta varios segundos más tarde. La IRM no puede, pues, seguir las "conversaciones" entre regiones cerebrales. Los únicos métodos que responden con rapidez suficiente son las técnicas de registro eléctrico. Se incluyen ahí la electroencefalografía (EEG), que detecta la actividad eléctrica del cerebro a partir del cuero cabelludo, y la magnetoencefalografía (MEG), la cual mide los campos magnéticos que genera la actividad eléctrica en el interior del cerebro.

Cabe aquí preguntar por qué no se utilizan la EEG ni la MEG para cartografiar la función cerebral en su totalidad. Ambas técnicas están limitadas en resolución espacial y sensibilidad. Aunque se ha avanzado mucho en resolución, especialmente en MEG, la localización precisa de la fuente de actividad cerebral sigue siendo difícil con los dispositivos de registro eléctrico. Y por si fuera poco, la resolución de la imagen empeora a medida que se profundiza en el cerebro.

Ni la IRM ni la TEP padecen tal limitación. Por ambos métodos puede representarse cualquier parte del cerebro con idéntica resolución espacial y sensibilidad. En consecuencia, parece que se prepara una colaboración entre TEP, IRM y el registro eléctrico. La TEP y la IRM, en combinación todavía por determinar, definirían la anatomía de los circuitos que sustentan un determinado comportamiento; por su parte, las técnicas de registro eléctrico revelarían el curso temporal de los diferentes sucesos en los circuitos espacialmente identificados.

Sea cual fuere la combinación de tecnologías que termine por adoptarse para obtener imágenes de la función cerebral, los recursos necesarios son de extraordinaria cuantía. El equipo utilizado para estos fines es muy costoso: un equipo IRM, TEP o MEG puede valer de 300 a 600 millones de pesetas y su mantenimiento

también es oneroso. Por añadidura, para lograr el éxito se requiere una estrecha colaboración con equipos multidisciplinares de científicos e ingenieros que trabajen a diario con tales instrumentos. Las instituciones que cuenten con suficientes recursos técnicos y humanos deberían ponerlos al alcance de los científicos de otras instituciones menos afortunadas. Aunque ciertos departamentos de radiología disponen de estos equipos, suelen dedicarlos casi exclusivamente al tratamiento de pacientes.

Además de imágenes de la actividad cerebral, los experimentos proporcionan un enorme volumen de información. Este acopio de datos no solamente da respuestas a las preguntas formuladas en el momento de la prueba, sino que también ofrece una inestimable información para investigaciones futuras. Los recientes trabajos para crear bases de datos de ciencia neurológica podrían extenderse a organizar y difundir prontamente tal depósito de información.

Utilizados sabiamente, estos instrumentos nuevos y los datos que proporcionan ayudarán a comprender y cuidar a personas que sufren trastornos de desarrollo en los estudios o alteraciones del habla resultado, por ejemplo, de un accidente cerebrovascular. Se ha comenzado a utilizar las imágenes de la función cerebral para estudiar las alteraciones de humor que afligen a pacientes con enfermedades mentales de tipo depresivo. La tecnología podría guiar a los neurocirujanos en la extirpación de tumores cerebrales, dándoles medios para valorar el efecto de la supresión de tejidos sobre el paciente. En centros de todo el mundo se investigan otras actividades mentales, como son la atención, la memoria, la percepción, el control motor y la emoción. Está claro que avanzamos hacia una comprensión mucho más plena de la relación entre la mente humana y el cerebro.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SOMATOSENSORY CORTICAL PLASTICITY IN ADULT HUMANS REVEALED BY MAGNETOENCEPHALOGRAPHY. A. Mogilner y otros en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 90, n.º 8, páginas 3593-3597; 15 de abril de 1993.

IMAGES OF MIND. M. I. Posner y Marcus E. Raichle. W. H. Freeman and Company, 1994.

PRACTICE-RELATED CHANGES IN HUMAN FUNCTIONAL ANATOMY DURING NON-MOTOR LEARNING. M. E. Raichle, J. A. Fiez, T. O. Videen, A.-M. K. MacLeod, J. V. Pardo, P. T. Fox y S. E. Petersen en *Cerebral Cortex*, vol. 4, n.º 1, págs. 8-26; enero/febrero de 1994.

Perfiles

John Horgan

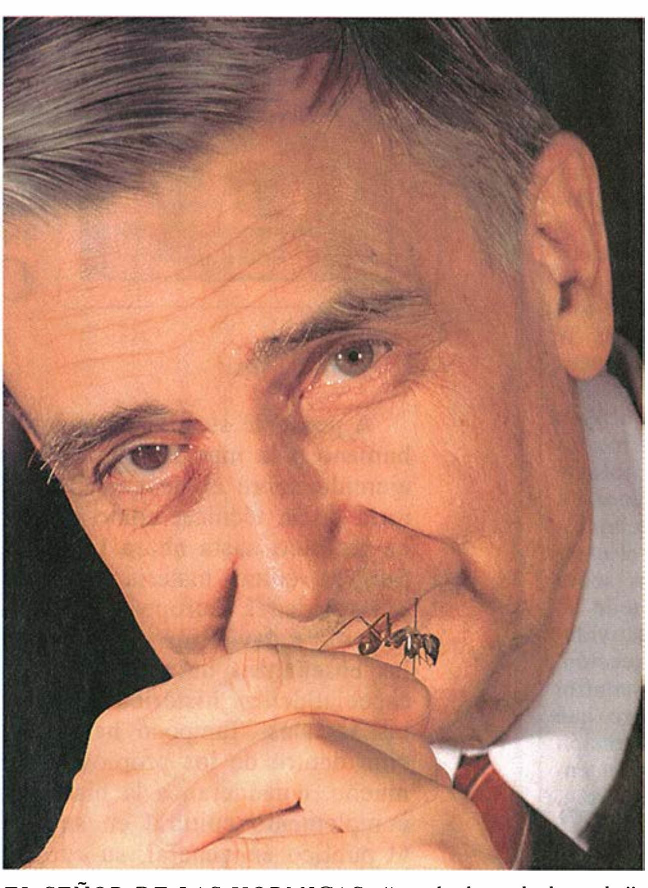
EDWARD O. WILSON: *De vuelta a los viejos campos de batalla*

A Edward O. Wilson se le conoce por su apasionada defensa de los biota, recientemente expuesta en *La diversidad de la vida*, aparecida en su versión española en 1994. Cuando franqueo su despacho en el Museo de Zoología Comparada de la Universidad de Harvard, resulta difícil imaginármelo en el centro de ninguna controversia. Tiene 64 años, ocupa la cátedra Baird y es gentil hasta el extremo. Habla sin parar de las hormigas, lo que no me sorprende en absoluto, pues es la primera autoridad mundial en la materia. "Ellas me lo han dado todo, y a ellas volveré siempre, como un brujo que consagra de nuevo el totem de su tribu".

Le pregunto si a la ciencia le quedan cosas por aprender de esas pequeñas criaturas, y exclama: "¡Si no hemos hecho más que empezar!". Se ha propuesto compilar el género *Pheidole*, que abarca más de 2000 especies, la mayoría de las cuales ni siquiera tienen nombre.

"La gran meta" de Wilson es convertir a *Pheidole* en banco de pruebas de tipos para los biólogos que quieran abordar la biodiversidad. Rebuscando en la vasta colección de hormigas de Harvard, se ha tomado la ardua tarea de describir y dibujar cada especie de *Pheidole*. "Quizá le resulte a usted muy aburrido", se excusa Wilson mientras le echo una ojeada a sus dibujos. Me confiesa que, cuando observa por el microscopio una especie hasta entonces desconocida, tiene "la sensación de que quizás esté viendo —no quiero ser demasiado poético— de estar viendo la faz de la creación".

A medio camino entre el empaque profesoral y la ingenuidad infantil me enseña su nido de hormigas cortadoras de hojas. Los escuálidos especímenes que pululan en la superficie son obreras; los soldados bullen por dentro. Wilson sopla en el agujero. Un instante después un enjambre de hormigas salen a la superficie, con sus enormes cabezas, las mandíbulas prestas. "Son capaces de cortar la suela de un zapato. Si intentara usted meterse en un nido, le harían picadillo poco a poco, con miles de cortes; como un tormento chino". Sonríe socarrón.



EL SEÑOR DE LAS HORMIGAS: "me lo han dado todo", dice Wilson. Sobre su índice, una hormiga carpintero gigante de Borneo

Me comenta que, si bien no ha escrito mucho sobre sociobiología en los últimos años, sus principios siguen empapando todo su trabajo. Alberga todavía grandes esperanzas sobre esa ciencia que fundó. Piensa que tiene posibilidades de "englobar la mayoría de las ciencias sociales y gran parte de la filosofía". Reprocha a los norteamericanos su rechazo inveterado a conocer la influencia de los genes en la configuración de nuestra conducta. "Este país está tan impregnado del dogma del igualitarismo que aparta su vista de todo lo que pueda parecer, ni de lejos, que pone en solfa la norma moral de que todos somos iguales, que se puede construir la sociedad perfecta con la buena voluntad de la gente". Cuando hilvana este sermón, la cara alargada y angulosa de Wilson, usualmente tan expresiva, se vuelve pétrea, como la de un pastor protestante.

Siempre en clave de biología, describe su propia carrera como una serie de adaptaciones a las presiones del entorno. Su padre era un funcionario federal trasladado de una ciudad a otra por todo el sur. "A causa de la dificultad de integración social que resulta de la condición perpetua de advenedizo, me aficioné a los campos y los bosques". A los siete años perdió la visión casi completa de su ojo derecho, al clavársele accidentalmente la aleta de un pez que acababa de sacar de un estanque. Con su agudo, si bien miope, ojo izquierdo, se concentró en los animales que pudiera inspeccionar de cerca, es decir, las hormigas.

Se formó en las universidades de Alabama y Tennessee y, desde 1951, en Harvard. Realizó trabajos de campo en Nueva Guinea, Fiji, Sri Lanka y otros lugares exóticos, descubriendo especies que mostraban un fantástico entramado de estructuras sociales. Con su trabajo de laboratorio, Wilson también contribuyó a demostrar que las hormigas y otros insectos sociales intercambian información a través de las feromonas, unos mensajeros químicos.

La amenaza que se cernía sobre los biólogos naturalistas espoleó su incursión en el campo de la sociobiología. A finales de los cincuenta, los biólogos moleculares, crecidos ante la posibilidad de descifrar el código genético, empezaron a cuestionar el valor de la taxonomía y otras ramas clásicas. James D. Watson, uno de los descubridores del ADN, que por entonces trabajaba en Harvard, "expresó públicamente su desdén por la biología evolutiva, a la que veía como un vestigio en vías de extinción, y que su refugio en Harvard ya había durado demasiado". El recuerdo es aún doloroso, y más cuando la consideración de la taxonomía respecto a la biología molecular puede que haya caído todavía más bajo. Wilson deplora esta situación. "Una exploración de la diversidad biológica mundial haría más por la humanidad que el Proyecto Genoma Humano", afirma rotundo.

Wilson respondió al reto de los biólogos moleculares ampliando sus miras, buscando las reglas de comportamiento que gobiernan no sólo a las hormigas sino a todos los animales sociales. Ese esfuerzo culminó en *Sociobiology*. Publicado en 1975, fue un repaso magistral de los animales sociales. Rememorando los vastos conocimientos de etología y genética de poblaciones que había acumulado, demostró que las pautas de apareamiento, la división del trabajo y otros fenómenos sociales eran respuestas para adaptarse a la presión evolutiva.

Sólo en el último capítulo dirigió una mirada a los humanos. Sostenía allí que la fiebre de la guerra, la xenofobia, la dominancia de los machos e incluso nuestros ocasionales destellos de altruismo tienen su origen, al menos en parte, en el impulso primordial por propagar nuestros genes. Las reseñas sobre el libro fueron en su mayoría favorables. Pero un grupo de científicos —sobre todo Stephen J. Gould y Richard C. Lewontin— le atacaron por promover una versión remozada del darwinismo social y proporcionar argumentos al racismo, la discriminación sexual y la barbarie nacionalista.

Asegura que "ahora hay muchas más pruebas" de que los rasgos humanos tienen una base genética. A decir verdad, muchos científicos, sobre todo en Occidente, rehúyen el término "sociobiología" porque todavía "conlleva una carga política". Aun así, disciplinas con nombres tan rebuscados como "estudios bioculturales", "psicología darwiniana" y "estudios de biología evolutiva sobre el comportamiento humano" son en realidad "brotes" del tronco de la sociobiología, si seguimos el hilo de Wilson.

Por ironía de las cosas, él mismo revelaba, al final de *Sociobiology*, ciertos temores sobre el fruto que podría dar el nuevo campo. "Cuando hayamos progresado lo suficiente como para explicarnos a nosotros mismos en estos términos mecánicos —escribió— y las ciencias sociales estén en sazón, el resultado puede ser duro de aceptar". Wilson reconoce que acabó el libro "un poco deprimido".

Se las arregló para escapar del callejón sin salida determinando que al menos dos empresas "no tienen fronteras". Una es la mente humana, que ha sido y sigue siendo conformada por la compleja interacción entre la cultura y los genes. "Vi que aquí teníamos una inmensa región ignota de ciencia e historia cuya exploración no acabará nunca". Escribió dos libros sobre este tema con Charles J. Lumsden, de la Universidad de Toronto: *Genes, mind and culture*, en 1981, y *Promethean fire*, 1983.

Wilson se dio cuenta de que había otra aventura en la que la humanidad podía sumergirse sin encontrar nunca el fondo: el estudio de la biodiversidad. "Con millones de especies, cada una con una compleja historia y una constitución genética casi inimaginables, tendremos una fuente de gozo intelectual y estético para las generaciones venideras". Wilson cree que esta búsqueda se verá impulsada por la "biofilia", una preocupación de origen genético que sienten los humanos por otros organismos.

"Con millones de especies, cada una con una compleja historia y una constitución genética casi inimaginables, tendremos una fuente de gozo intelectual y estético para las generaciones venideras"

Desarrolló esta teoría en su libro *Biophilia*, de 1984. Mas al reunir estadísticas sobre la abundancia de las especies, cuando confeccionaba el libro, cayó en otra depresión. Encontró que las especies están desapareciendo a un ritmo alarmante; su tan querida diversidad corría peligro de extinción. Ese sentimiento le llevó a enarbolar el estandarte de la biodiversidad.

Los escritos de Wilson sobre la biodiversidad han sido ponderados incluso por los que antes le criticaban. Gould, en una reseña aparecida en *Nature*, alababa *La diversidad de la vida* calificándolo de "una mezcla perfectamente lograda de información y profecía". Pero su loa no era completa; Gould ponía en cuestión la teoría de la biofilia aduciendo que la propensión de los humanos a la destrucción de la vida no es menor que la que muestran hacia la preservación de la misma.

Wilson responde que eso "ha ocurrido más debido a la ignorancia de la humanidad que al deseo de barrer de la faz de la Tierra otras formas de vida". Gould, de quien Wilson se considera "bastante amigo", es "alérgico a la idea de que la naturaleza humana tenga una base biológica, y he de decir que creo que ahora es casi el único que piensa así".

Wilson tiene la intención de dejar bien alto el pabellón de la sociobiología en dos nuevos libros. (Se confiesa "adicto al trabajo" y ha escrito o es editor de 18 libros y más de 300 artículos científicos y de divulgación.) Uno es una completa autobiografía que está casi terminada y que espera ver publicada a finales de año. "Estoy volviendo a los viejos campos de batalla", señala.

El siguiente libro de Wilson tratará sobre "filosofía natural", un término ya gastado que rescató para designar con él "el ignoto y difuso espacio que queda entre la biología, las ciencias sociales, el razonamiento moral y la ecología". Quizá la tesis más radical del libro será que los hallazgos de la biología evolutiva pueden servirnos de guía para resolver disputas morales sobre temas tan diversos como la conservación de las especies o el control de la natalidad.

La mayoría de los filósofos e incluso de los científicos creen que la biología evolutiva "no puede ser prescriptiva", asegura. "Eso es verdad hasta cierto punto", añade, "pero mi postura es que los preceptos morales sobre los que estamos todos de acuerdo son los que dicta la historia evolutiva".

Lejos de promover el fatalismo, el conocimiento de nuestras raíces evolutivas debería ayudarnos a desembarazarnos de pautas de comportamiento peligrosas. Una sociedad basada en preceptos sociobiológicos nos ayudaría a desarrollar un sistema político más racional, uno que promoviera "el máximo crecimiento personal" a la vez que preservara el medio.

Ciencia y sociedad

Agujeros de gusano cuánticos

Y constantes de la naturaleza

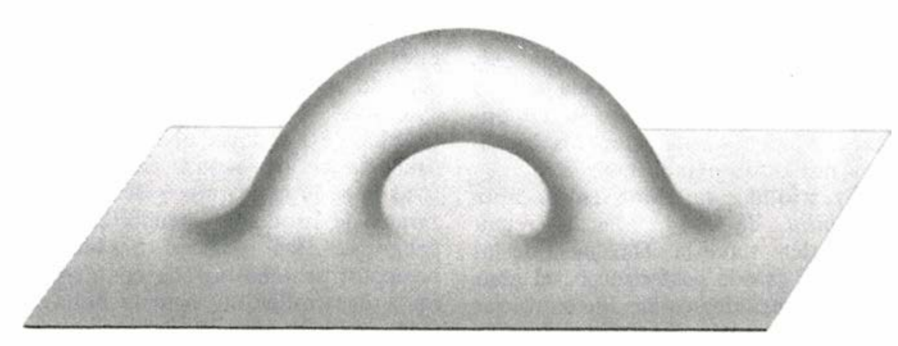
En el primer tercio del siglo veinte se establecieron tres de las teorías más revolucionarias de la física: la relatividad especial, la relatividad general y la mecánica cuántica. Cada una de ellas está caracterizada por una ley física de profundas consecuencias.

La relatividad especial surgió de la necesidad de explicar los fenómenos físicos en los que las velocidades de las partículas se aproximan a la de la luz. Tiene su principio básico en la constancia de la velocidad de la luz, que representa un límite inalcanzable por las partículas dotadas de masa. En su descripción, espacio y tiempo forman parte de un mismo continuo, el espaciotiempo. De la teoría de la relatividad especial se deduce la equivalencia entre masa y energía, consecuencia que se confirmó muy pronto en observaciones de rayos cósmicos, cuya vida media se dilataba respecto a la de las mismas partículas en el laboratorio.

La relatividad general describe los fenómenos físicos en presencia de campos gravitatorios. De acuerdo con el principio de equivalencia, en que se basa, todos los cuerpos caen con la misma aceleración en un campo gravitatorio. Este principio permite reducir la gravedad a geometría, ya que, si todos los cuerpos se comportan de la misma manera bajo un campo gravitatorio, dicho movimiento no se deberá a tal campo, sino a una propiedad del propio espaciotiempo, su curvatura. Existen numerosos experimentos que la confirman, como la famosa observación de la desviación de la luz por el Sol o la explicación de la precesión anómala del perihelio de Mercurio.

Por último, la mecánica cuántica describe el mundo microscópico de los átomos y de las partículas subatómicas. En su marco, el principio de incertidumbre afirma que es imposible medir simultáneamente y con precisión la posición y el momento de una partícula; cuanto mejor queramos conocer su posición, más imprecisa será la medida de su momento y viceversa. La mecánica cuántica asigna a cada partícula una función de onda que determina la probabilidad de encontrar dicha partícula en un cierto punto del espaciotiempo. Aun cuando en el ámbito de la mecánica clásica una partícula no pueda atravesar una barrera física, lo que se conoce por región clásicamente prohibida, la mecánica cuántica predice, sin embargo, una probabilidad no nula de que dicho proceso ocurra. Este proceso recibe el nombre de "efecto túnel", decisivo en el estudio de los agujeros de gusano, según veremos.

Mediado ya el siglo comenzaban a conocerse bastante bien los fenómenos cuánticos de velocidades relativistas, descritos por la teoría cuántica de campos. A tenor de su predicción fundamental, confirmada experimentalmente en los grandes aceleradores, se crean pares de partícula-antipartícula a partir de energía. Por otro lado, la relación de incertidumbre entre tiempo y energía (análoga a la de posición y momento) sugiere que el vacío está formado por pares que se crean y vuelven a desaparecer, a costa de la incertidumbre en la energía, durante un intervalo de tiempo muy pequeño. Estas fluctuaciones cuánticas actúan apantallando los valores reales de las cargas y masas de las partículas; decimos que las "visten".



Un agujero de gusano conecta, mediante efecto túnel, dos regiones espaciotemporales alejadas

En teoría cuántica de campos, el vacío es un mar de partículas y antipartículas en continua creación y aniquilación mutua, caracterizado por una energía no nula que recibe el nombre de constante cosmológica. Dicha teoría predice un valor enorme para la constante, puesto en entredicho por los datos de la observación. En efecto, una energía de vacío muy alta engendraría enormes fluctuaciones en el campo gravitatorio o, de acuerdo con la teoría general de la relatividad, en la curvatura del espaciotiempo, lo que supondría que el universo jamás podría haber alcanzado el tamaño que posee. Los agujeros de gusano podrían desempeñar un papel fundamental en la solución de esa aporía.

¿Cómo unir ambos extremos, el mundo microscópico y el universo? Carecemos de una guía experimental que nos indique el camino para describir los fenómenos cuánticos gravitatorios. Dichos fenómenos ocurren a escalas de energías tan grandes y distancias tan pequeñas que están fuera del alcance experimental. Carecemos también de una teoría completa de la gravedad cuántica; tan sólo disponemos de unos retazos indicativos de lo que podrían ser sus características más notables.

La escala en la que los efectos cuánticos, gravitatorios y relativistas admiten un tratamiento comparable se denomina escala de Planck y su distancia característica es de 10^{-33} centímetros. Es difícil imaginar la estructura que tiene el espaciotiempo a esa escala. Sí sabemos que tales efectos predominan en el fin de la evaporación de los agujeros negros y en el origen del universo.

Pero, ¿por qué es tan difícil construir una teoría cuántica de la gravedad? Ya hemos aludido a la ausencia de datos experimentales. Hay, además, otra razón de carácter más filosófico-teórico: dado que gravedad y geometría espaciotemporal son conceptos indisolubles, cuantizar la gravedad significa cuantizar el espaciotiempo, el marco que contiene todos los sucesos y en el que la mente coloca y organiza todos sus acaeceres y visicitudes. Los efectos cuánticos de la gravedad difuminan ese marco; hacen que el espacio y el tiempo pierdan

su profundo sentido organizador de los acontecimientos. Así, al intentar saber con precisión cuándo y dónde ocurrió cierto suceso, introducimos una perturbación incontrolable, tanto mayor cuanto mayor es la precisión que queremos alcanzar.

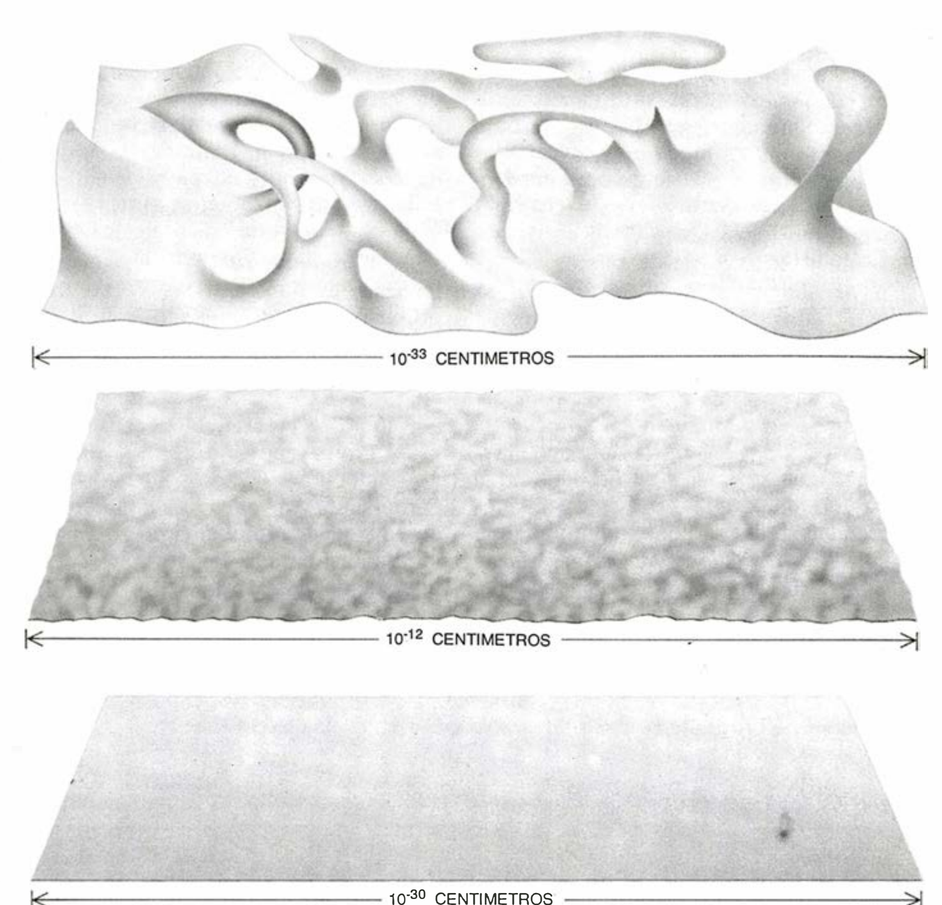
En la escala de Planck, la perturbación introducida es tal, que el espacio y el tiempo pierden su significado; las propias relaciones de causalidad dejan de tener validez. Podemos imaginar que el espaciotiempo en esa escala es como un magma hirviente, lleno de pequeñas secciones que se separan y se unen al cuerpo principal. Esta es la riqueza, la complejidad y, a la vez, el problema principal en la construcción de una teoría cuántica de la gravedad, del espaciotiempo.

Las fluctuaciones del espaciotiempo adoptan diferentes formas. Una de ellas, los agujeros de gusano. Median éstos el paso de una región espaciotemporal clásicamente permitida a otra, a través de una zona en la que la evolución clásica no es posible (en la que la noción de espaciotiempo carece de sentido), aprovechando un efecto túnel análogo al descrito en el marco de la mecánica cuántica. Por tanto, los agujeros de gusano pueden representarse por pequeñas asas espaciotemporales que conectan dos regiones alejadas. Su naturaleza es estrictamente cuántica; forman parte del magma espaciotemporal. Como todos los entes cuánticos, pueden describirse por funciones de onda que permiten evaluar la probabilidad de que se produzca la transición mediante efecto túnel entre las dos regiones espaciotemporales.

Aunque los agujeros de gusano viven en la escala de Planck, su presencia se deja sentir en la física de las grandes distancias (comparadas con la de Plank). Su energía y su carga son nulas. Por tanto, de estos túneles espaciotemporales tiene que salir tanto como entra. Cuando nuestra resolución es mucho menor que la distancia de Planck, es decir, cuando no podemos ver los detalles, la entrada y salida de partículas puede interpretarse como una interacción puntual entre las partículas y los ubicuos agujeros de gusano. Sin embargo, su carencia de energía y de carga los hace indetectables y, por ende, tampoco es posible conocer su estado concreto. Contando con esta ignorancia intrínseca para cualquier observador, las interacciones de los agujeros de gusano quedan sustituidas por su efecto global.

Los agujeros de gusano visten, pues, las constantes de la naturaleza de forma análoga a la que las fluctuaciones del vacío en la teoría cuántica de campos modifican los valores efectivos de los parámetros físicos (las cargas y las masas de las partículas, por ejemplo). El resultado final es que dichas constantes están sujetas a una distribución de probabilidad que denuncia nuestra ignorancia sobre el estado concreto de los agujeros de gusano.

Una de tales constantes es la cosmológica. La distribución de probabilidad para las constantes de la naturaleza tiene un pico muy pronunciado, de hecho infinito, en el valor cero para la constante cosmológica efectiva. De esta manera, las fluctuaciones cuánticas de la gravedad podrían ser las responsables de la pequeñez de la constante cosmológica o, visto desde otro punto de vista, una constante cosmológica despreciable podría ser la primera señal indirecta de la existencia de fenómenos cuánticos gravitatorios, de otra forma indetectables y, así, explicar la aparente contradicción que existe entre el valor predicho por la teoría y el valor observado. Dicha distribución de probabilidad podría predecir valores concretos para las demás constantes. Sin embargo, debido a las dificultades que surgen a la hora de tratar los infinitos de la distribución, es prematuro afirmar que los agujeros de gusano permitan fijar las demás constantes de la naturaleza.



Las fluctuaciones cuánticas difuminan la estructura espaciotemporal a la escala de Planck. Los conceptos clásicos de causalidad y distancia pierden su sentido

LUIS J. GARAY
Grupo de física teórica
del Imperial College, Londres

JUAN GARCIA-BELLIDO
Departamento de física de
la Universidad de Stanford

Plantas y CO_2

Mecanismo de retroalimentación

La concentración atmosférica de dióxido de carbono (CO_2) se cifra en torno a unas 350 partes por millón, un 25 % más que al comienzo de la Revolución Industrial. Se prevé que la concentración de CO_2 doblará la actual el siglo que viene. Además del interés despertado por el impacto que ello tendría sobre el clima de la Tierra a través del efecto invernadero, importa sobremanera conocer la influencia directa de ese incremento sobre la vida vegetal del planeta, al tratarse de un gas que constituye la materia prima de la fotosíntesis.

Son numerosos los estudios dedicados a la respuesta de las plantas ante

altas concentraciones de CO_2. Los resultados, dispares, se muestran a veces contradictorios. En general, sin embargo, se reconoce que las plantas perennes de crecimiento rápido, propias de terrenos alterados y con metabolismo fotosintético C_3, entre las que se incluyen muchas de interés económico, aumentan substancialmente su tasa fotosintética, peso y producción de frutos y semillas cuando reciben dosis extra de CO_2.

Esa observación suscitó, en un comienzo, el optimismo en torno a la capacidad de la vegetación de incrementar su biomasa y productividad y, por tanto, de absorber cantidades crecientes de carbono, compensando con ello el aumento de emisiones de CO_2 a la atmósfera. La perspectiva de mejores cosechas también parecía prometedora. Pero ocurría que esas investigaciones se realizaban, por lo común, en plantas aisladas, cultivadas por lapsos cortos y en condiciones óptimas de disponibilidad de agua, luz y nutrientes.

Al introducir en los experimentos factores limitantes, tales como baja provisión de nutrientes o déficit hídrico, se ha visto que el aumento en la concentración de CO_2 apenas produce efecto, si es que produce alguno, sobre el crecimiento de las plantas. Domina ahora la opinión de que no debiéramos dejarnos llevar por el optimismo, ya que las condiciones de la vegetación real son de disponibilidad limitada de recursos y de interacción entre especies.

Efecto de una alta concentración de CO_2 sobre una comunidad de hierbas típica de suelo fértil. La microcomunidad superior se cultivó durante unos tres meses bajo la concentración de CO_2 actual (350 partes por millón), mientras que la de abajo recibió una concentración de 700 partes por millón

En sistemas de baja fertilidad, la respuesta a altas concentraciones de CO_2 parece inhibirse por falta de nutrientes, según indican los experimentos sobre microcomunidades de tundra realizados por el equipo de W. Oechel, de la Universidad de California en San Diego. Por contra, y aunque los resultados son contradictorios, las comunidades de suelos fértiles podrían incrementar su biomasa y productividad ante altas concentraciones de CO_2; respaldan esa idea los experimentos de campo acometidos por B. G. Drake, P. S. Curtis y sus colegas, del Centro Smithsoniano de Investigaciones Ambientales de Edgewater, sobre comunidades estuarinas, y los numerosos estudios de campo sobre cultivos examinados por D. W. Lawlor y R. A. C. Mitchell, de la Estación Experimental de Rothamsted.

Sin embargo, los experimentos realizados en la Universidad de Sheffield por los autores, con la colaboración de J. Harris y E. McPherson, de la Universidad de East London, sugieren que las altas concentraciones de CO_2 tampoco estimularían significativamente el crecimiento de la vegetación en sistemas fértiles; la razón estaría en un mecanismo de retroalimentación inducido por las propias plantas.

Comenzamos por traer al laboratorio suelo extraído de dos sitios diferentes del norte de Inglaterra: una comunidad de hierbas sobre suelo fértil y un brezal-pastizal sobre suelo ácido de muy baja fertilidad. Incubamos el suelo del campo, que contenía semillas de plantas silvestres, en condiciones que emulaban las que sufre una extensión acotada de terreno sin alterar desde el comienzo de la primavera hasta finales del verano. Se formaron comunidades en miniatura, dominadas por hierbas o por brezo y pastos, según el tipo de suelo.

La mitad de estas microcomunidades creció bajo una atmósfera normal; la otra mitad recibió una concentración de CO_2 de 700 partes por millón, es decir, la que se presume habrá hacia fines del próximo siglo. Este tratamiento no produjo cambios notables en la biomasa de los dos tipos de microcomunidades. En el caso de las comunidades de hierbas, las dos especies más abundantes —la maleza perenne *Rumex obtusifolius* y la pequeña *Cardamine flexuosa*— mostraron síntomas evidentes de que la alta concentración de CO_2, lejos de favorecerlas, comportaba efectos negativos: decoloración, senescencia prematura, empequeñecimiento foliar. Las hojas analizadas presentaron un aumento en el contenido de carbohidratos y una disminución en el contenido de nitró-

geno. La situación no mejoró en un segundo experimento, cuando se le agregó dosis extra de nutrientes al suelo.

En cambio, las especies más abundantes en la comunidad de brezal-pastizal no mostraron ninguno de los síntomas mencionados, y el brezo *Calluna vulgaris* —codominante junto con la gramínea *Agrostis capillaris*— registró un leve aumento en su crecimiento.

Cuando J. Harris y E. McPherson analizaron el suelo sobre el que se habían desarrollado las microcomunidades, descubrieron que, en presencia de altas concentraciones de CO_2, los microorganismos edáficos almacenaban bastante más carbono y nitrógeno que en condiciones normales. Esto, que se daba en ambos tipos de suelo por igual, no afectaba a las plantas de lento crecimiento adaptadas a condiciones de baja fertilidad, como el brezo, pero tenía una perceptible influencia sobre aquellas otras que, para su rápido crecimiento, necesitan altas concentraciones de nutrientes del suelo.

Entre otros, R. Norby, R. J. Luxmoore y su equipo, del Laboratorio Nacional Oak Ridge, han revelado que, con altas concentraciones de CO_2, se produce una mayor liberación de carbohidratos desde las raíces hacia el suelo, ya sea en forma de compuestos solubles o de raicillas senescentes. Se crea así un excelente substrato para los microorganismos, que multiplican su número y actividad.

Los experimentos llevados a cabo en Sheffield sugieren que, al aumentar la razón carbono/nitrógeno de los microorganismos edáficos de vida libre y favorecer su crecimiento demográfico, éstos secuestran nutrientes, compitiendo con las plantas. Adviértase que las plantas de crecimiento lento, propias de suelo infértil, que no mostraron síntomas negativos, poseen en general asociaciones con hongos micorrízicos, mientras que las de crecimiento rápido que evidenciaron síntomas negativos suelen carecer de simbiontes radicales. Cabe la posibilidad de que las micorrizas sean un sumidero adicional de carbohidratos, que así no llegarían al suelo, ni sería tan destacada la proliferación de microorganismos de vida libre en torno a sus raíces. En perfecto acuerdo con este planteamiento, el equipo de B. Campbell, de Palmestorn North, ha observado que los cultivos de alta calidad forrajera que poseen nódulos radicales con bacterias fijadoras de nitrógeno (el trébol, por ejemplo) se ven estimulados por altas concentraciones de dióxido de carbono, cuando medran sobre suelo natural.

Si bien ya se han iniciado algunos experimentos de campo en el norte de Inglaterra, se desconoce la extensión de ese fenómeno en la naturaleza con las concentraciones atmosféricas de CO_2 previstas para el próximo siglo. De darse al menos en algunos de los sistemas reales, podría traer consigo varias implicaciones. Ignoramos cuánto nitrógeno sería preciso agregar al suelo para desbaratar el mecanismo de retroalimentación, pero muchos cultivos que se realizan sin abonos, en el Tercer Mundo sobre todo, pueden verse afectados. En cambio, los cultivos que poseen nódulos con bacterias fijadoras de nitrógeno (la soja, el trébol y otras leguminosas) pueden resultar favorecidos. En los sistemas naturales, podría cambiar la razón entre plantas que poseen micorrizas y las que no las poseen.

Es difícil prever cuál sería el resultado de la interacción entre estos mecanismos, consecuencia directa de un aumento en la concentración atmosférica de CO_2, y posibles alteraciones del clima (elevación de la temperatura y cambios en el régimen de precipitaciones). Sería interesante averiguar qué pasaría, por ejemplo, si la sequía produjera una mortandad generalizada de los microorganismos del suelo.

Pero la conclusión principal que hemos de extraer es que resulta arriesgado extrapolar a las comunidades y los ecosistemas el comportamiento observado en experimentos fisiológicos sobre plantas individuales. Las respuestas drásticas emitidas por un individuo pueden aparecer sumamente atenuadas cuando hablamos de la vegetación. Por otro lado, hay mecanismos de retroalimentación casi insospechables en el individuo que pueden emerger en sistemas más complejos. El mecanismo aquí descrito constituye sólo un ejemplo. De ahí la imperiosa necesidad de realizar más experimentos con microcomunidades, o mejor aún directamente en el campo, aun cuando esto comporte dificultades operativas y condiciones mucho menos controladas que en los experimentos tradicionales de laboratorio.

SANDRA DIAZ
Instituto de Biología Vegetal.
CONICET-Universidad
Nacional de Córdoba, Argentina.

PHILIP J. GRIME
Catedrático y Director de
la Unidad de Ecología Vegetal
Comparada. Universidad de
Sheffield, Inglaterra.

Teoría estándar

Caza en la cima

Con el título *A Schematic Model of Mesons and Baryons* publicaba Murray Gell-Mann, en 1964, una breve nota donde introducía los quarks en la física moderna. En un ejercicio de aguda inteligencia e intuición, así suele acontecer en los grandes descubrimientos, ponía de relieve lo que estaba ya ante la vista de todos: bastaban tres objetos elementales para "explicar" el enjambre de las partículas subelementales descubiertas desde la segunda guerra mundial, primero en las colisiones de los rayos cósmicos y, luego, en los choques, más controlados y numerosos, producidos en los aceleradores de energías crecientes. Los dos primeros quarks, *u* (o *arriba*) y *d* (o *abajo*), componen protones y neutrones: $P = uud$ y $N = udd$; los estados quark-antiquark dan cuenta de los mesones π, postulados por Hideki Yukawa en los años treinta como portadores de las fuerzas nucleares.

Este segundo aspecto suponía de suyo una revolución, al reducir a una sola raíz la materia nuclear (protones y neutrones) y los transmisores de fuerzas. Pero, ¿cuál era el origen de las fuerzas nucleares primarias, las que ligan quark y antiquark en las partículas nucleares? Era esta una de las objeciones, aunque no la única, que convertían todavía en "esquemática" la teoría formulada por Gell-Mann e independientemente por George Zweig, y que se resolvería sólo varios años más tarde con el descubrimiento de la cromodinámica cuántica (CDC), la teoría fundamental de las interacciones nucleares.

La realidad física de los quarks emergió con nitidez en 1969, en el acelerador lineal de Stanford, cuando se pudo explorar el protón mediante electrones de alta energía. Observado con un "microscopio" de alta resolución, se vio que el protón estaba compuesto por objetos puntiformes, los quarks. La naturaleza elemental de los quarks se confirmó más tarde, en los experimentos realizados en los anillos de colisión electrón-positrón (ADONE en Frascati y LEP en Ginebra); además, habrá de someterse a ulteriores pruebas, a lo largo de los próximos años, en el acelerador HERA de Hamburgo, que posee, hoy por hoy, la mayor potencia resolutiva.

Pero volvamos a las clases de quarks. El tercer quark, el quark *s* (o *extraño*), interviene en la composición de *las partículas extrañas*, observadas en los rayos cósmicos en

1947. El quark *s* debe tener una masa algo superior a la de los otros dos y ser inestable. Por esa razón, en nuestro universo, las partículas extrañas aparecen sólo en las colisiones de alta energía, para desaparecer luego en un brevísimo lapso de tiempo.

Naturalmente, nada impedía en los años sesenta pensar que hubiera otros tipos de quarks, más pesados incluso que el *s*, pero el esquema de Gell-Mann y Zweig funcionaba tan bien que nadie sentía la necesidad de ocuparse de ellos. Por contra, sí resultaba estrictamente necesario un cuarto quark —el quark *c* (o *encanto*)— para no caer en contradicción con las informaciones precisas acumuladas sobre desintegraciones de los mesones *K* neutros. El par (*c*,*s*) forma la segunda generación de quarks, en adición a la primera (*u*,*d*).

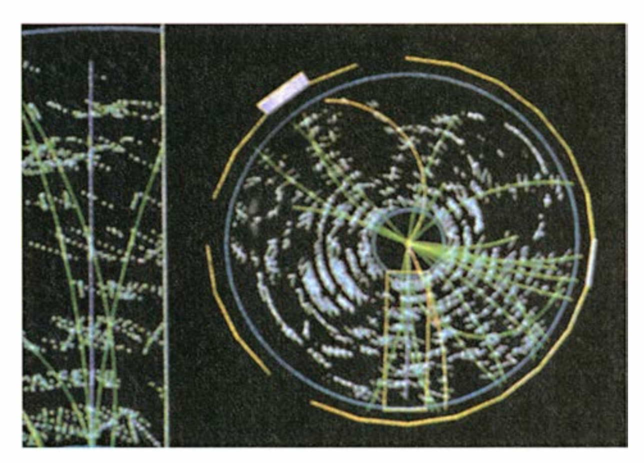
La tercera generación de quarks entró en escena en la segunda mitad de los años setenta, propiciada por dos razones. La primera tuvo que ver con el descubrimiento de una nueva partícula dotada de carga eléctrica, aunque desnuda de interacciones nucleares, el leptón τ, parecido al electrón y al muon. Estas dos últimas partículas, y sus neutrinos, acompañan a las dos primeras generaciones de quarks. El descubrimiento de un tercer leptón sugería, en efecto, la existencia de una tercera generación de quarks, los llamados quark *b* (o *fondo*) y *t* (o *cima*).

La segunda razón, sugerida por los japoneses M. Kobayashi y K. Maskawa, era que, con tres pares de quarks, podía explicarse la violación de la simetría materia-antimateria que se observaba en las desintegraciones de los mesones *K*. El quark *b* lo halló, en 1977, el grupo de Leon L. Lederman; su masa viene a quintuplicar la del protón. Quedaba así abierta la veda del quark *cima*, hasta su probable alcance en el Tevatrón de Chicago. El quark *t* tiene una masa de unas 170 veces la masa del protón, muy superior de lejos a la masa de todos los demás.

¿Por qué costó tanto hallarlo? Debido, en primer lugar, a su enorme masa y, por ende, a la elevada energía necessaria para producirlo. Hoy eso sólo cabe conseguirse en el Tevatrón, un anillo de colisión protón-antiprotón con energía global de unos 2 TeV (1 TeV es la energía equivalente a unas mil veces la masa del protón). Ahora bien, incluso contando con energía suficiente se trata de una empresa muy difícil, habida cuenta de la astronómica cantidad de colisiones que dan resultados carentes de interés; en configuraciones insólitas, podrían confundirse con acontecimientos genuinos que señalen la producción de un quark *cima*. Es la clásica imagen de la aguja en el pajar, que justifica la cautela de los autores a la hora de anunciar su hallazgo.

Los elementos de "calidad" del aparato que han posibilitado la hazaña han sido: 1) la capacidad de medir la energía de las partículas, cubriendo la mayor parte de las direcciones posibles; 2) la posibilidad de identificar los quarks *b*, productos típicos de la desintegración de los quarks *t*. La primera característica se materializa en la estructura compacta del detector colisionador del Fermilab, que rodea por entero el punto de colisión. El revelador de partículas ha exigido el empleo de técnicas refinadas, en gran parte desarrolladas para el propio experimento.

¿Qué queda por hacer? El valor de la masa del quark *cima*, altísimo en relación con la masa de los demás, está envuelto en el misterio. En realidad es el propio origen de la masa de las partículas lo que sigue mostrándose esquivo. El descubrimiento del quark *t* confirma la teoría estándar, pero pone de manifiesto nuestra ignorancia de la cuestión. ¿Son las masas un dato inicial, incluido en la creación, y del que sólo podemos tomar nota, o constituyen un hecho dinámico, obtenible por las leyes de base, como los niveles del átomo de hidrógeno? Más aún: ¿son quarks y leptones la única forma de materia que hay en la naturaleza?



Trazas de la colisión en que se supone apareció el quark cima

La historia continúa. La próxima estación será la investigación del bosón de Higgs, parada crucial para la comprensión del origen de las masas. En el transfondo se distingue la investigación de nuevos tipos de materia, los previstos por las teorías supersimétricas, que podrían explicar la materia obscura del universo.

LUCIANO MAIANI
Universidad de Roma

Sinapsis reforzadas

Por óxido nítrico

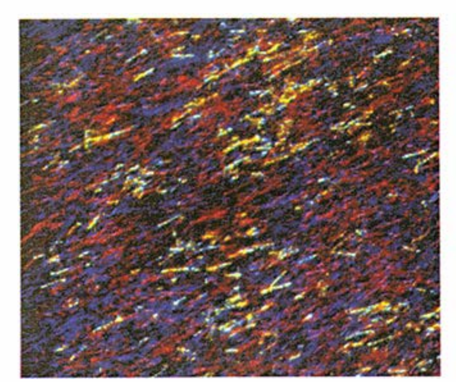
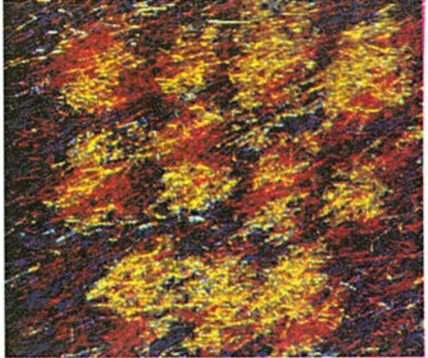
¿Cómo establece y almacena los recuerdos el cerebro? Los neurólogos solían abordar la cuestión centrándose en las neuronas y en las sinapsis que las ponen en conexión; algo parecido al proceder de los ingenieros que intentaran determinar cómo están comunicados entre sí los hogares de una ciudad siguiendo el tendido telefónico. Pero la imagen actual del enfoque que ahora siguen los neurólogos sería la escucha a hurtadillas de las conversaciones a través de las ventanas, abiertas de par en par.

La investigación se apoya en la potenciación a largo plazo (PLP), un mecanismo neuronal del que se supone que desempeña un papel crucial en la memoria y en el aprendizaje. Se produce cuando repetidas transmisiones o impulsos a través de las sinapsis producen un efecto de realimentación positiva, facilitando la ejecución de ulteriores transmisiones. El primero que propuso la existencia de un mecanismo de PLP fue Donald O. Hebb, hace cuarenta años.

Es aceptado por muchos que, para que actúe un mecanismo de PLP, se ha de enviar una señal, en sentido inverso, desde la neurona postsináptica (receptora del impulso) hacia la neurona presináptica (la emisora original del impulso), que refuerce la vinculación entre ambas células. Esa señal hipotética ha recibido la denominación de mensajero retrógrado.

Hace unos años, Daniel V. Madison y Erin M. Shuman, de la Universidad de Stanford, entre otros especialistas, realizaron una serie de experimentos de los que se infería la posibilidad de que el mensajero retrógrado fuera el óxido nítrico. Este gas soluble es tan reactivo, que perdura escasos segundos. Además, circula con facilidad, entrando y saliendo de las membranas celulares, viajando al margen de los canales normales de comunicación.

Pero Madison y Shuman se plantearon la cuestión siguiente: Si el

La simulacion del aprendizaje en volumen muestra que la difusión del óxido nítrico podría reforzar las conexiones neuronales en regiones circunscritas del cerebro

óxido nítrico se difundía desde la célula postsináptica hacia la presináptica, ¿podría afectar a las sinapsis vecinas? En el caso de una respuesta afirmativa, la hipótesis contradiría el supuesto —fundamental para el aprendizaje hebbiano— de que el PLP que se da en una sinapsis no afecta a las sinapsis vecinas. La idea de que el PLP fuera específico de una sinapsis "constituía un dogma", refiere Schuman.

En realidad, las pruebas de que el mecanismo de PLP quizá no estuviera estrictamente confinado las presentaron en 1989 expertos del Instituto Max Plank de Biología Cibernética de Tübingen. Cuando provocaron una potenciación en la sinapsis de una neurona del hipocampo de una rata, la potenciación se intensificó en las sinapsis vecinas. En esta época, muchos aceptaban que los resultados no eran lo suficiente consistentes para echar por tierra la tesis aceptada.

Madison y Schuman repitieron los experimentos de los especialistas alemanes utilizando mejores instrumentos y un control mucho más apurado y obtuvieron los mismos resultados. Gracias a estos experimentos demostraron que el óxido nítrico intervenía en la producción del efecto. Cuando introdujeron una sustancia química que bloqueaba la síntesis de óxido nítrico en una neurona postsináptica, el PLP no ocurría ni en esa sinapsis ni en las vecinas.

Madison y Schuman señalaron en *Science* que el óxido nítrico podría ser un eslabón más de una cadena que generaba el efecto de difusión. Con todo, las pruebas de una actividad extracelular del óxido nítrico continuaban acumulándose. Tres semanas después de que apareciera publicado el trabajo de Madison y Schuman, un grupo dirigido por P. Read Montague y Michael J. Friedlander, de la Universidad de Alabama, anunció, también en *Science*, que el óxido nítrico podría servir de intermediario en interacciones entre rutas neuronales que no mantienen una conexión directa.

Para Eric R. Kandel, de la Universidad de Columbia, autoridad en bases moleculares de la memoria, el mensaje de todo este trabajo es claro: el antiguo modelo de Hebb sobre el aprendizaje, que ignora el contexto extracelular de la comunicación, peca de excesiva simplicidad. "Y esa es la opinión más extendida entre los profesionales", asegura. Lo cierto es que los nuevos hallazgos corroboran una teoría alejada de la hebbiana y propuesta en 1990 por Montague, además de Joseph A. Gally y Gerald M. Edelman, del Instituto de Neurología de Nueva York. En este modelo de aprendizaje en volumen, la difusión del óxido nítrico no sólo contribuye a la formación de la memoria, sino también a la organización espacial del cerebro durante el desarrollo embionario. Los efectos aludidos podrían deberse a la reconocida capacidad del óxido nítrico para dilatar los vasos sanguíneos, así como a su papel reforzante de conexiones neuronales.

Terence J. Sejnowski, del Instituto Salk para Estudios Biológicos de San Diego, cree que el aprendizaje en volumen podría explicar por qué las neuronas se agrupan en capas a la manera de catafilos y forman estructuras columnares en ciertas regiones del cerebro. La anchura de estas capas y columnas viene a coincidir con el alcance efectivo de una señal de óxido nítrico que se difunde. Sejnowski espera que los experimentos futuros revelen que el óxido nítrico es un actor más del reparto en un drama complejo. "Parece", afirma, "que hay toda una familia de mensajeros de propagación, cada uno con sus propios objetivos y tiempo de actuación, que contribuye a la plasticidad y al desarrollo."

JOHN HORGAN

De cerca

Fotos y texto: Kōji Nakamura

Incubador



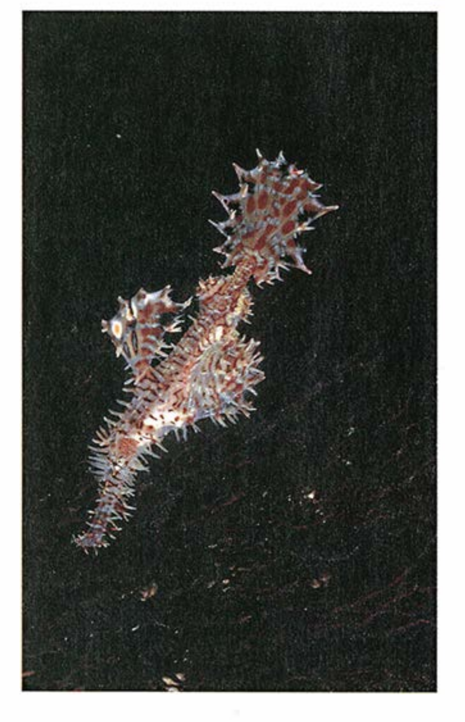




FOTO SUPERIOR
distancia focal: 55 mm
diafragma: F = 8
exposición: 1 / 80 de segundo
película: ISO = 25

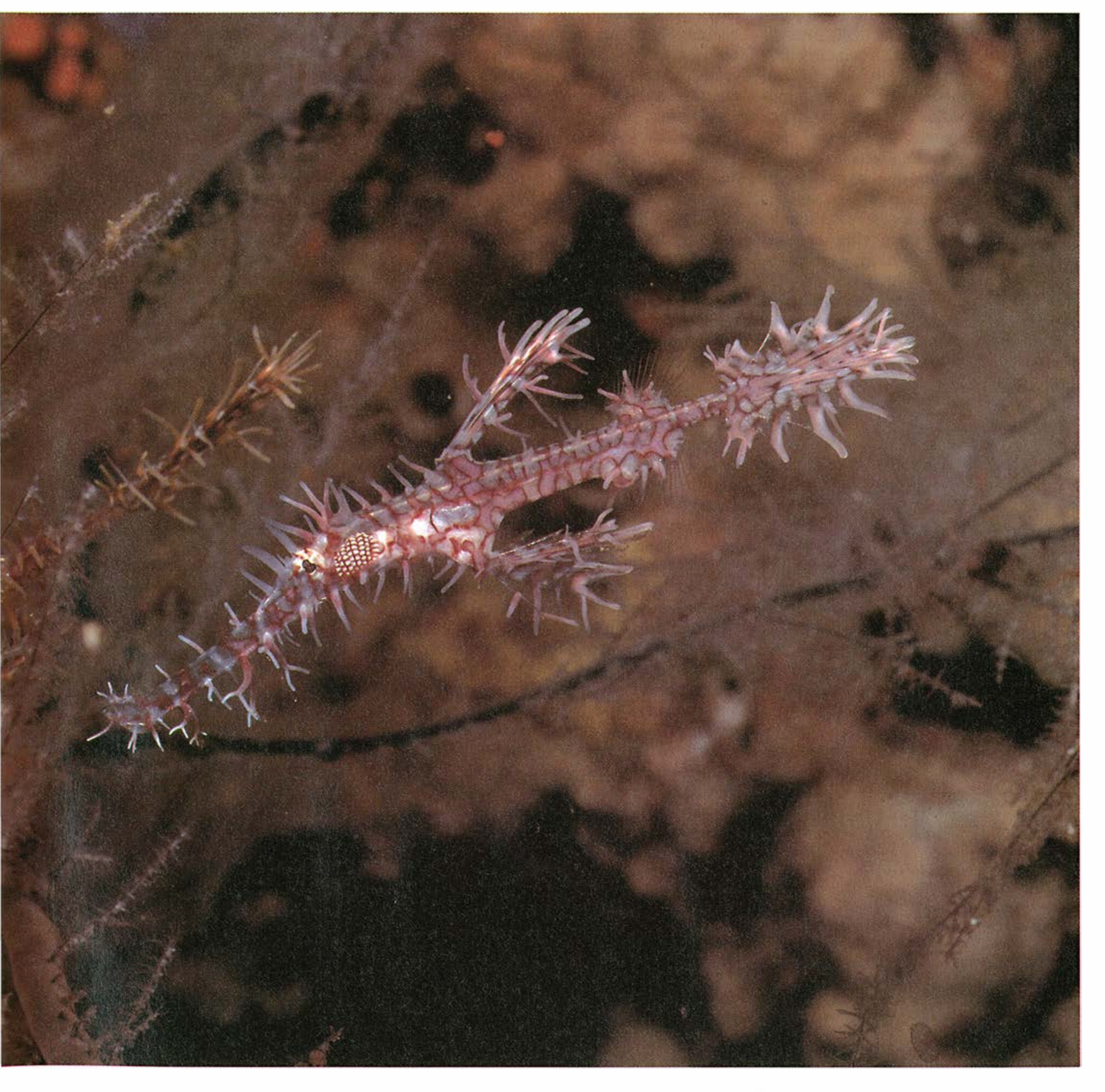
FOTO DE LA IZQUIERDA
distancia focal: 55 mm
diafragma: F = 8,5
exposición: 1 / 80 de segundo
película: ISO = 25

FOTO DE LA DERECHA
distancia focal: 55 mm
diafragma: F = 11
exposición: 1 / 80 de segundo
película: ISO = 25

Es conveniente, siempre, tener sobre la mesa un buen manual de zoología. A mí, el viejo *Grassé* me resuelve no pocos problemas al tiempo que me ilustra con sus morosas descripciones de nitidez cartesiana. No me ha defraudado a propósito de *Solenostomus*. Por él sé que estos peces portan filamentos ovígeros; vale decir, llevan los huevos envueltos en una película amarrada a la superficie mediante un pedículo.

Debe de haber unas cinco especies de *Solenostomus*, pero varían tanto en su morfología externa que cualquier inadvertido pensaría que se trata de géneros, si no familias, distintos. Cierto es que comparten determinados caracteres: hocico tubular, boca pequeña, cuerpo breve y comprimido, aletas espinosas y placas óseas que forman anillos que ciñen el cuerpo. Carecen de escamas.

Había visto alguna que otra vez ejemplares de *Solenostomus paradoxus* en el mar de Izu, merodeando entre las algas. Para sacar las fotos me trasladé a Filipinas, a un sitio llamado El Nido por los españoles que dominaron el archipiélago hasta finales del siglo pasado. Allí abundan cual si vivieran en su entorno más idóneo.



Química y física de la cocina

La ciencia va desentrañando las razones físicas y químicas que se esconden detrás de los platos maestros de los chefs, al tiempo que aporta algunas recomendaciones

Nicholas Kurti y Hervé This-Benckhard

Crece el interés por la aplicación de la ciencia al arte de la cocina. Los cocineros miraban antes con recelo, si no con hostilidad, la llegada del razonamiento científico y las técnicas de laboratorio a los figones. Parece que esos tiempos han pasado. Pero lo mismo en los restaurantes que en las casas particulares se tiende a permanecer fieles a las tradiciones y prácticas culinarias que les han sido enseñadas, sin saber siquiera si esas prácticas garantizan los mejores resultados. Se echa un pizca de harina a las natillas para que no se corten, se siguen estrictas reglas para hacer suflés o se cumplen al pie de la letra las proporciones de ingredientes que dan las recetas. Dominan todavía en la cocina las supersticiones y los cuentos de viejas.

La desconfianza que suscitan las explicaciones científicas de los misterios culinarios resalta más si recordamos cuánto deben la música, la pintura, la escultura y la interpretación a los estudios y descubrimientos experimentales. La ciencia ha mejorado las técnicas de conservación, reproducción y divulgación de las obras de arte. No hay prueba alguna de que la ciencia y la técnica hayan puesto en peligro la creatividad en absoluto; puede que incluso la hayan fomentado.

Los científicos tienen también el deber de hacer que los artistas de la cocina conozcan principios y técnicas que quizás estimulen su imaginación. Se está en esa línea. La física empieza a investigar el estado de las emulsiones, suspensiones, dispersiones sólidas y espumas —la "materia blanda", como dice Gilles de Gennes— que a menudo se producen al cocinar. La química estructural avanzada permite elucidar el comportamiento de carbohidratos complejos, proteínas y otras macromoléculas. Nuevos métodos cromatográficos posibilitan que se aíslen los componentes de los alimentos a los que se deben gustos y aromas. Va habiendo explicación científica de los viejos trucos de cocina.

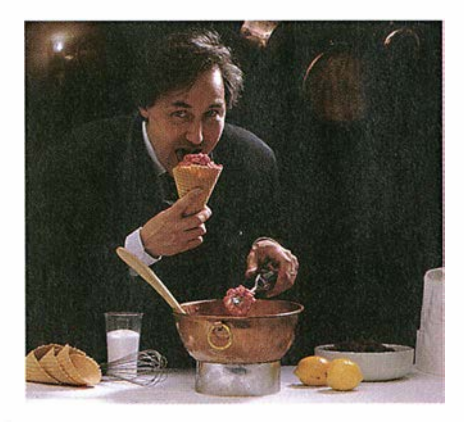
Ha nacido una nueva disciplina: la gastronomía física y molecular. Nos gustaría ofrecer un pequeño festín de descubrimientos hechos en este campo, relativos a aperitivos, platos principales, postres y bebidas, que quizá sean de utilidad e interés para los cocineros. Varios de nuestros ejemplos proceden de las conferencias y demostraciones discutidas en el Primer Seminario Internacional de Gastronomía Física y Molecular, celebrado en agosto de 1992 en la siciliana Erice.

Un entrante popular, el *oeuf dur mayonnaise* (huevo duro con mayonesa), nos da la oportunidad de examinar las propiedades físicas y moleculares de las emulsiones. La mayonesa, la crema, la mantequilla y la salsa bearnesa son emulsiones, donde gotas de un líquido están suspendidas en otro, inmiscible con el primero.

La mayonesa consta de aceite vegetal, vinagre o zumo de limón y yema de huevo. La mitad de la yema es agua; por tanto, la mayonesa viene a resultar una emulsión de aceite en agua. De suyo, una mezcla de estos dos componentes se separaría, por mucho que se la bata, en capas distintas; pero la mayonesa es estable porque la yema contiene moléculas de superficie activas, como las lecitinas. Los dos cabos de estas moléculas con forma de varilla tienen propiedades diferentes: uno es hidrófilo (tiene afinidad con el agua), el otro hidrófobo (la rehúye). Cada glóbulo de aceite en la suspensión de mayonesa está recubierto por al menos una capa de lecitina, que le permite mezclarse libremente con el medio acuoso; la razón es que la parte hidrófila toca el agua mientras la hidrófoba mira hacia el aceite. Las gotas no entran fácilmente en coalescencia, pues los extremos hidrófilos que sobresalen de sus superficies suelen adquirir carga eléctrica y, en consecuencia, se repelen mutuamente.

Los cocineros creen que una yema emulsiona sólo de 150 a 250 mililitros de aceite. Esta proporción se queda muy corta. Lo ha demostrado Harold J. McGee. Sabiendo que una yema contiene unos dos gramos de lecitina y suponiendo que las gotas de

NICHOLAS KURTI y HERVE THIS-BENCKHARD vienen colaborando en el nuevo campo de la gastronomía física y molecular desde 1989. Kurti, profesor emérito de la Universidad de Oxford, ha cultivado la criofísica, magnetismo, energía y la física culinaria. This-Benckhard es redactor de *Pour la Science*, edición francesa de *Scientific American*. Se formó en la Escuela Superior de Física y Química Industrial de París, licenciándose también en filología románica por la Universidad de París.

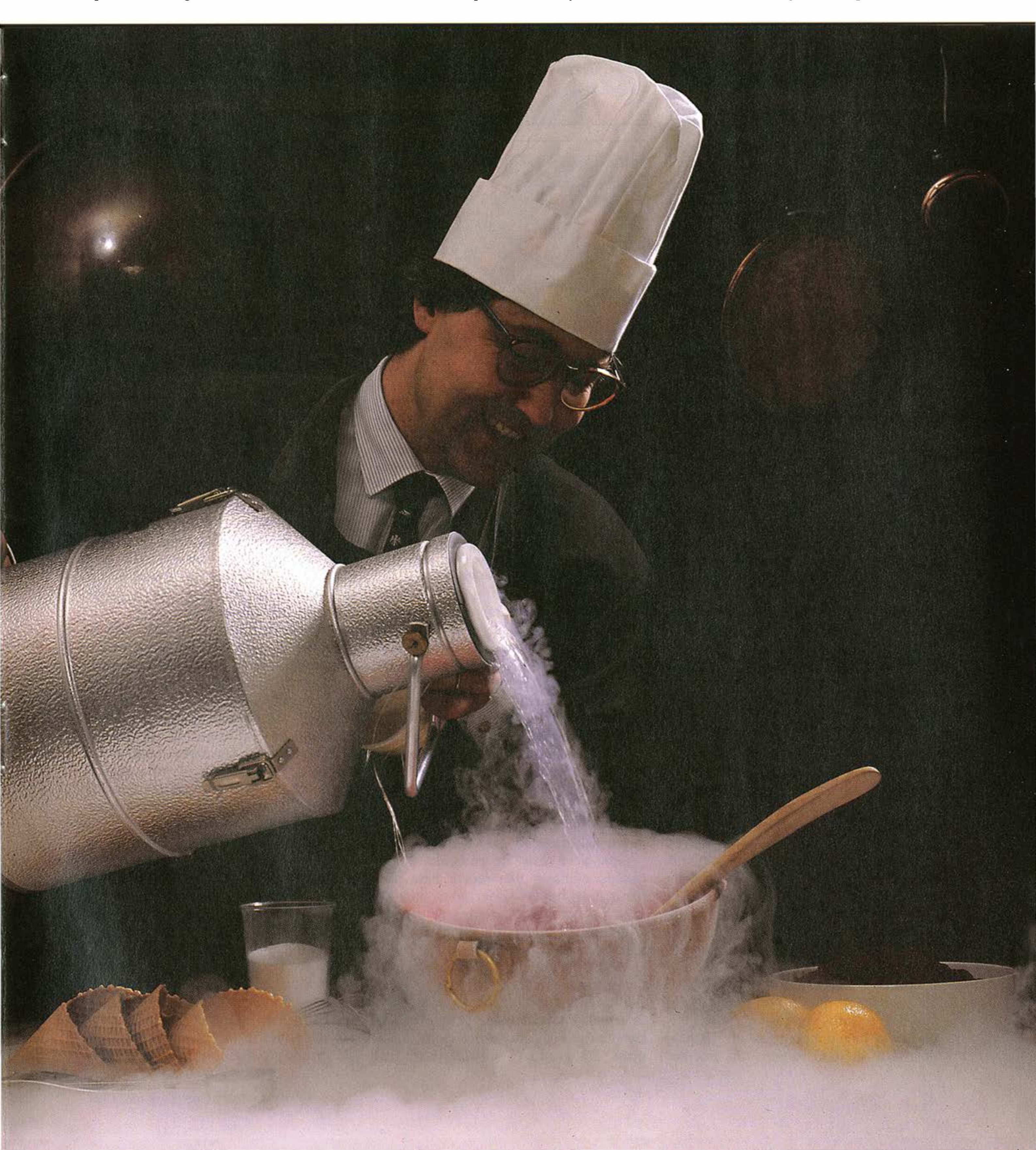


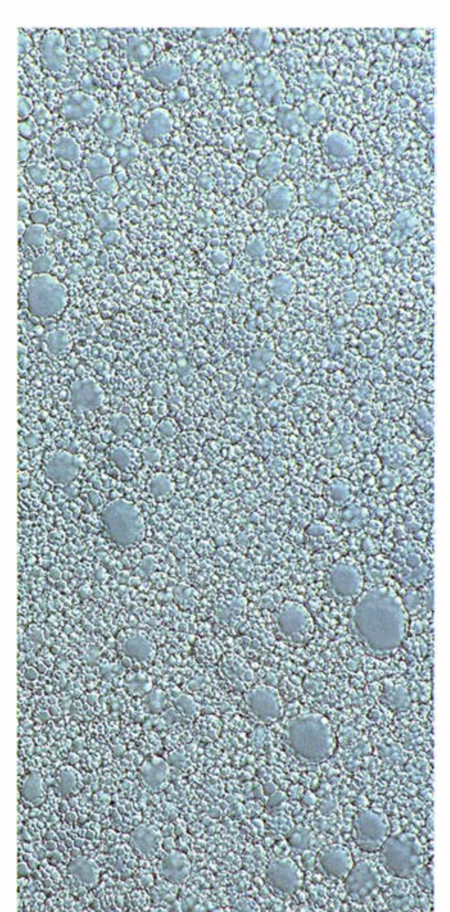
1. LA CREMA DE HELADO instantánea, producida mediante la vaporización de nitrógeno líquido, es una de las delicias culinarias creadas gracias a una nueva técnica. El esfuerzo conjunto de científicos y cocineros aclara por qué ciertas prácticas de cocina funcionan y, en algunos casos, cómo cabe mejorarlas.

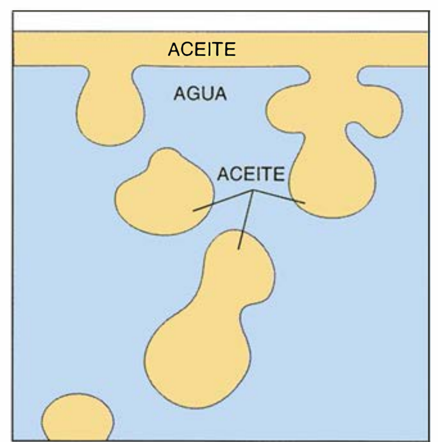
aceite de la mayonesa tienen un diámetro de una centésima de milímetro, calculó que una yema puede estabilizar tres litros y medio de aceite, unas 20 veces la cantidad recomendada. El truco consiste en ir añadiendo suficiente agua, vino, vinagre u otra solución acuosa que mantenga separadas las gotas de aceite.

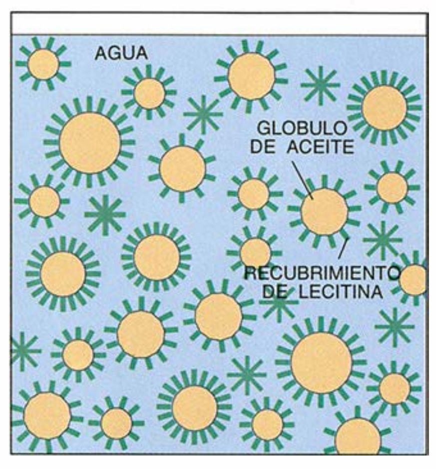
El trabajo de McGee nos dice que la ciencia puede forzar los límites de un procedimiento culinario. No es nuestra intención sugerir que se abandone la regla tradicional por "una yema cada tres litros y medio", pero conocer la nueva podría a veces ser útil. Suponga que alguien a quien ha invitado a cenar quiere un *oeuf dur mayonnaise*, y usted sólo tiene en la despensa un huevo y nada de mayonesa. Con una aguja hipodérmica extraiga un mililitro de yema, haga con ella una cucharada sopera de mayonesa y cueza el resto del huevo.

Hay cierto miedo a comer huevos contaminados por *Salmonella*. En 1988, un alto cargo del departamento









2. LA MAYONESA (*a la izquierda, ampliada cien veces*) es una suspensión de aceite en agua. De ordinario, las mezclas de aceite y agua se separan en capas distintas (*arriba, a la derecha*). La mayonesa es más estable, sin embargo, gracias a la lecitina contenida en la yema de huevo que se añade. Como las lecitinas tienen un extremo hidrófilo y otro hidrófobo, los recubrimientos de lecitina rodean los glóbulos de aceite y permiten que se dispersen en la solución acuosa (*abajo a la derecha*). El tamaño medio y la distribución de tamaños de las gotas de aceite dependen de la proporción de aceite y de la cantidad de energía de agitación: cuanto mayores sean ésta y la cantidad de aceite, el tamaño disminuye y la gama de diámetros se estrecha.

de sanidad británico anunció, exagerando, que la mayoría de los huevos producidos en Gran Bretaña estaban infectados por la bacteria. Durante dos semanas, el consumo de huevos descendió a la mitad, y varios expertos en gastronomía dibujaron un sombrío futuro sin huevos pasados por agua ni tortillas poco cuajadas.

Uno de nosotros (Kurti), preguntándose qué podía hacer la ciencia para atajar semejante calamidad, examinó el problema de los huevos pasados por agua. (Hemos de advertir que los huevos pasados por agua a la británica tienen la clara blanda pero coagulada y la yema cremosa, a diferencia del *oeuf coque* a los tres minutos francés, que es más líquido en todas sus partes.) Observó que la yema coagula entre los 62 y los 65 grados, y que la salmonela sólo sobrevive unos pocos minutos expuesta a una temperatura de 59 grados. Un método seguro de cocinar debería, pues, asegurar que la temperatura de la yema no pase nunca de los 62 grados y que esté entre los 59 y los 61 grados al menos durante seis minutos.

Se puede medir la temperatura en el centro de la yema de un huevo con un termopar, sensor eléctrico cuyo voltaje de salida varía con la temperatura. Se enhebra un fino cable de termopar en una aguja hipodérmica y se fija a su cabeza; a continuación se conecta el termopar a un microvoltímetro calibrado en grados centígrados.

Gracias a este instrumento se ha podido elaborar una receta para preparar, con huevos infectados, huevos pasados por agua carentes de riesgo. Coloque un huevo de 60 gramos en agua hirviendo durante tres minutos y medio. (Esa inmersión, según han demostrado Richard Gardner y Rosa Beddington, de Oxford, da a la clara la consistencia debida, pero eleva la temperatura de la yema sólo hasta unos 30 grados.) Ponga inmediatamente el huevo al baño maría a 60 grados. La temperatura de la yema ascenderá gradualmente hasta los 59 grados en siete minutos y medio. Thomas J. Humphrey, de Exeter, ha mostrado que huevos inoculados con un millón de organismos de *Salmonella enteritidis* dejan de ser peligrosos mediante este tratamiento tras 18 minutos de cocción.

¿Hay alguna manera de que los huevos crudos puedan emplearse sin riesgo para preparar mayonesas u otros platos? Sí; la temperatura que mata la salmonela es inferior a la de coagulación de la yema. Ponga las yemas en una vasija y coloque ésta al baño maría a 62 grados, durante unos 15 minutos, agitando de vez en cuando las yemas. Otra posibilidad es hacer la mayonesa con yemas de huevos duros diluidos con un poco de vinagre (la coagulación del huevo no destruye las lecitinas). De hecho, la mayoría de los libros de cocina recomiendan que se prepare con yemas de huevos duros la *mayonnaise tartare*, que contiene cebolla, alcaparras y hierbas, además de los habituales vinagre, mostaza, sal y pimienta.

Pero no se han resuelto todos los misterios. En la preparación de natillas, *zabaglione* (ponche de huevo) y varias salsas sabrosas espesadas con yema de huevo, hay que calentar las yemas en presencia de otro líquido. Es muy normal, sin embargo, que estas mezclas se corten al calentarse. Como saben los cocineros hace mucho, una pizca de harina evita este problema. En Erice se discutió qué mecanismo se esconde tras la solución de los cocineros.

Se forman grumos porque, en una solución acuosa, las macromoléculas proteínicas de la yema se liberan de algunas de las débiles fuerzas de enlace (puentes de hidrógeno, puentes de sulfuro) que las mantienen arrolladas. Cuando se calientan lo suficiente, las proteínas se desnaturalizan, o desenrollan, y establecen nuevos enlaces débiles con otras moléculas. Cuando las proteínas se juntan y crean agregados, aparecen los grumos.

La harina detiene el proceso de agregación porque sus partículas constan principalmente de dos tipos de almidón: la amilosa, un polímero lineal de la glucosa, y la amilopectina, un polímero muy ramificado del mismo azúcar. A alta temperatura, estos almidones se desprenden del gránulo de harina y se disuelven. Parece, aunque no está confirmado experimentalmente, que las macromoléculas de almidón inhiben la formación de grumos porque limitan los movi-

mientos de las proteínas y evitan su agregación. Convendría saber también cuánta harina hace falta para evitar que se hagan grumos y qué tipo de almidón funciona mejor. El número de experimentos que sólo este fenómeno sugiere subraya el enorme trabajo necesario para desentrañar los procesos más elementales de la cocina.

Consideremos ahora un plato algo más complejo: el suflé. Su elaboración recuerda los equilibrios del funambulista. El suflé ideal se expande mucho durante la preparación y tiene una corteza crujiente que envuelve un interior esponjoso y algo cremoso. Los ingredientes básicos son claras batidas, un preparado viscoso, como la salsa besamel (mezcla de mantequilla, harina y leche), y, a menudo, yemas de huevo. A veces se añaden pescado, queso, chocolate y puré de frutas, que se convierten en partes importantes de la estructura del suflé; para dar sabor se pueden emplear vainilla, licores y otros ingredientes. Las recetas varían mucho en lo tocante a las proporciones de todos estos elementos, pero todos los libros de cocina destacan la importancia que tiene el mezclar uniformemente la preparación viscosa y las claras batidas; insisten también en que, al dispersar la espuma de la besamel, los cocineros han de tener cuidado en no romper las miríadas de burbujas de aire.

Algunos chefs creen que, una vez puesto el suflé en la fuente, hay que introducirlo de inmediato en un horno ya caliente. Otros dicen que la mezcla puede guardarse durante una hora a la temperatura de la cocina o en un baño maría a cuarenta grados durante media hora. Según ciertos informes, es posible congelar a fondo pequeños suflés para una persona y descongelarlos antes de cocinarlos. Hemos sometido a prueba estas cuatro técnicas con suflés para uno. Todas dieron resultados aceptables, pero el suflé metido en el horno justo una vez se han echado las claras de huevo batidas resultó ser la mejor. Nos imaginamos que los otros métodos dejan que las burbujas de la mezcla se fundan unas con otras y se escapen.

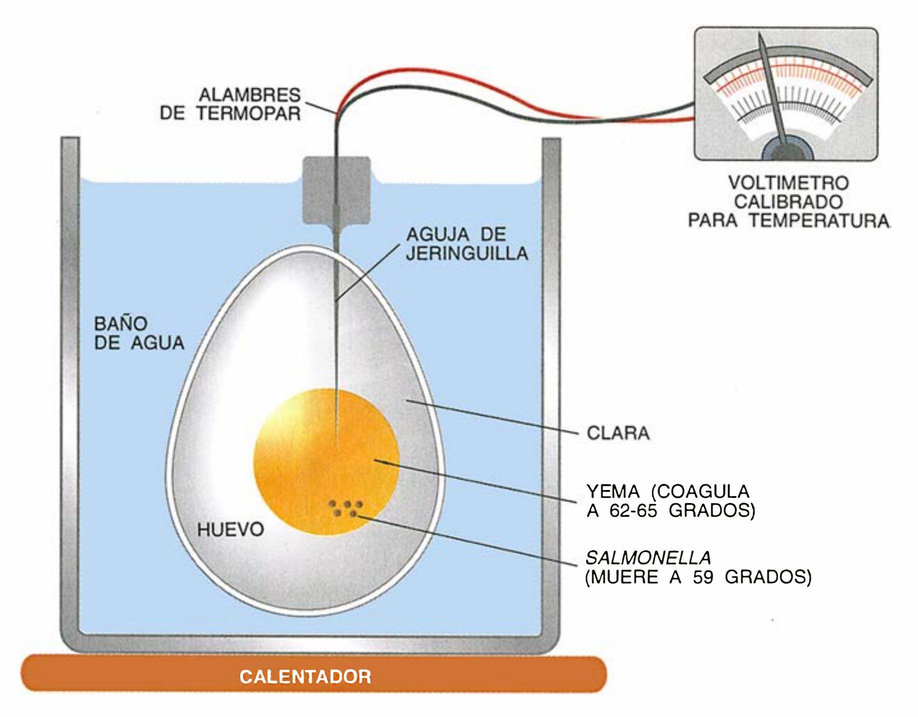
Sea cual sea el método de elaboración, el suflé ha de servirse en seguida, pues si ha subido de forma perceptible empezará a contraerse segundos o minutos después de que se le haya sacado del horno. Aunque ciertos detalles de cómo sube y baja el suflé están envueltos en el misterio, la explicación general es bastante sencilla. Para algunos autores, al calentarse la masa viscosa de harina y yemas, las burbujas de aire se expanden y levantan el suflé. La coagulación de los huevos vuelve al material entre las burbujas lo suficientemente rígido para impedir que el suflé se contraiga, por lo menos hasta que la temperatura caiga. Sin embargo, la expansión del aire debida al calor sólo explica un aumento del volumen en torno a un 20 %, pero un suflé puede hasta triplicar su tamaño original. En realidad, el suflé se infla por efecto del vapor de agua, como se demuestra fácilmente: abra el suflé ya cocinado, y escapará vapor de agua.

Las primeras medidas del cambio de temperatura dentro de un suflé mientras se cocina se efectuaron hace 25 años. Se fijó a la fuente un termopar insertado en una aguja hipodérmica de forma que, al principio del experimento, su punta estaba 20 centímetros bajo la superficie del suflé. Así se demostró que, durante los 10 primeros minutos, la temperatura dentro del suflé llega a los 45 grados. A veces se estaciona (quizás a causa de la coagulación de proteínas) e incluso puede descender cuando el termopar toca partes más frías, todavía sin cocinar, de la mezcla. Pasados otros 25 minutos (el tiempo depende del tamaño del suflé), la temperatura se eleva de nuevo a medida que el agua se evapora deprisa desde arriba. El aumento rápido indica que el suflé está hecho. Los cocineros que no sean reacios a meter un termopar en la cocina hallarán seguramente que la detección remota de cómo progresa el suflé les es una buena ayuda.

Hasta aquí nos hemos limitado a considerar maneras de entender varios procesos de cocina, y no de mejorar sus resultados. Pero hay casos en que bastan mínimas modificaciones de los métodos tradicionales para alterar los sabores. La concentración de un caldo para preparar un *fond* es un buen ejemplo.

El caldo se hace hirviendo carne y verduras en agua. Aparte del propio valor de los ingredientes, el caldo forma también el *fond*, o base, de muchas salsas. Para este uso, se hierven los caldos hasta reducirlos, o concentrarlos, a la décima o vigésima parte de su volumen original. Ahora bien, cuando se hierve una mezcla de compuestos químicos, la composición del vapor suele diferir un tanto de la composición del líquido. Por ejemplo, al hervir vino, que es una mezcla de alcohol y agua, se evapora primero una mayor cantidad de alcohol. La diferencia entre el vapor y el líquido depende de la temperatura a que se caliente. ¿Sería un *fond* elaborado mediante la reducción de un caldo a 100 grados diferente de otro preparado a 80 o 60 grados?

En el seminario de Erice se enseñó a los participantes un tosco aparato que mostraba cómo se reducía a



3. LA TEMPERATURA en el interior de un huevo mientras se cuece se mide con un sensor eléctrico, el termopar, y un microvoltímetro. Los experimentos realizados con este equipo han posibilitado una receta para pasar huevos por agua de manera tal que toda *Salmonella* sea destruida.

menor temperatura un caldo disminuyendo la presión del aire. Se conectaba una jarra de cristal que contenía el caldo a una bomba filtrante, y se bajaba su presión interna a media atmósfera. A esa presión, el caldo hervía a sólo 80 grados. Se está diseñando un aparato mejor a fin de establecer si la cocina a baja presión tiene alguna ventaja.

Antes de que procedamos con nuestro plato principal —de carne—, hemos de decir unas palabras acerca del calentamiento. En la cocina tradicional hay dos métodos característicos de proporcionar calor a los alimentos. Uno consiste en exponer la sustancia a un líquido caliente (como ocurre al hervir, cocer, freír y rehogar) o a un gas caliente (como al asar y cocer al horno). Cuando las moléculas del medio calefactor golpean la superficie del alimento, le transfieren su energía cinética. En el segundo método, representado por la parrilla, la radiación electromagnética golpea la comida y se convierte en calor. En ambos casos, el calor llega al interior de la sustancia sólo por convección y conducción. Como las distintas partes del alimento que se cocina están expuestas al calor de manera diferente, ni el sabor ni la textura son uniformes. Nuestro disfrute de un filete poco hecho, una barra de pan crujiente o una tortilla esponjosa depende mucho de esos gradientes de temperatura y de las discontinuidades de textura y composición.

La posibilidad de calentar el interior de un material sin que se caliente primero el exterior se descubrió durante la Segunda Guerra Mundial, cuando se observó casualmente que las microondas de unos diez centímetros de longitud de onda podían atravesar un notable espesor de un material dejando al hacerlo parte de su energía en forma de calor. El fenómeno depende de la presencia de moléculas polares, las del agua, por ejemplo, que son eléctricamente neutras pero cuya disposición de cargas es asimétrica. Las microondas hacen que las moléculas polares giren u oscilen; el rozamiento dentro del material transforma la energía cinética en calor. El hielo no absorbe las microondas porque sus moléculas de agua están fijas en cristales y no pueden rotar. Por tanto, si se usan para ello microondas, se puede hervir agua dentro de un bloque de hielo o crear una "alaska tostada" invertida, o un "florida helado", que está caliente por dentro pero tiene una corteza helada.

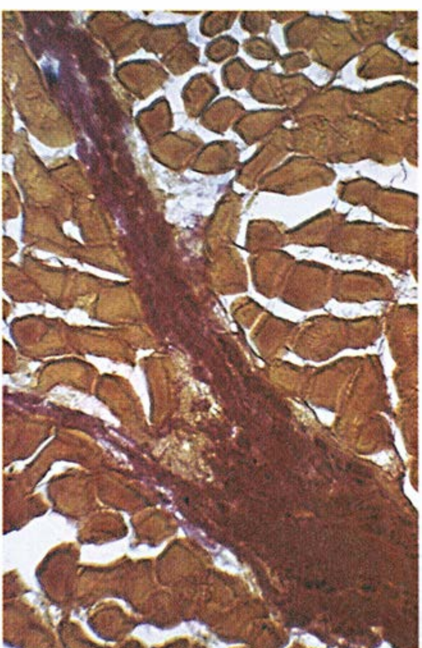
Cuando se prepara la carne en un horno de microondas, se calienta uniformemente a 100 grados, temperatura que se mantendrá mientras conserve agua. El cocinar la carne con microondas tiene dos ventajas: es más rápido y gasta menos energía. Por su lado, la cocción convencional en un caldo que contenga hierbas y verduras presta sabores adicionales a las carnes.

La carne asada tiene más sabor que la cocida porque se producen reacciones pardas que se intensifican a los 100 grados. Los azúcares y aminoácidos de la carne pueden entonces enlazarse unos con otros y crear muchos tipos de compuestos, algunos sabrosos, otros de color tostado. Estas reacciones de Maillard, como se las llama, crean la costra de las carnes asadas.

Para conseguir los mejores sabores, el cocinero quizá quiera combinar la tradicional parrilla con la cocina de microondas. Un buen ejemplo es el pato asado Pravaz-Cointreau, parte de cuyo nombre honra a Charles Gabriel Pravaz, uno de los inventores de la jeringuilla hipodérmica. Para tostarlas, se ponen a la parrilla o se fríen las piezas de un pato descuartizado, y hecho esto se les inyecta Cointreau, licor que, por tener mucha agua, absorbe bien las microondas. Se las mete a continuación en un horno de microondas para cocinarlas por dentro, lo que sólo lleva unos pocos minutos. Con este método, la carne se cuece desde su interior en un medio con gusto a naranja; el plato parece una versión modernizada del pato a la naranja.

No hay comida que esté completa sin un buen postre. De la física viene una receta que no sólo le facilita las cosas al cocinero, sino que da lugar a un magnífico espectáculo. Este postre, el helado instantáneo, fue concebido por Peter Barham, de Bristol. Como fin apropiado de una







4. MIENTRAS SE COCINA, la carne sufre diversos cambios físicos y químicos. Cuando está fresca, cruda (*izquierda*), sus fibras (*rojo*) están separadas por colágeno (*amarillo*). Tras un breve intervalo de calentamiento (*centro*), el colágeno empieza a fracturarse. La carne ya cocinada del todo (*derecha*) está tierna porque casi todo el colágeno se ha disociado en gelatina.

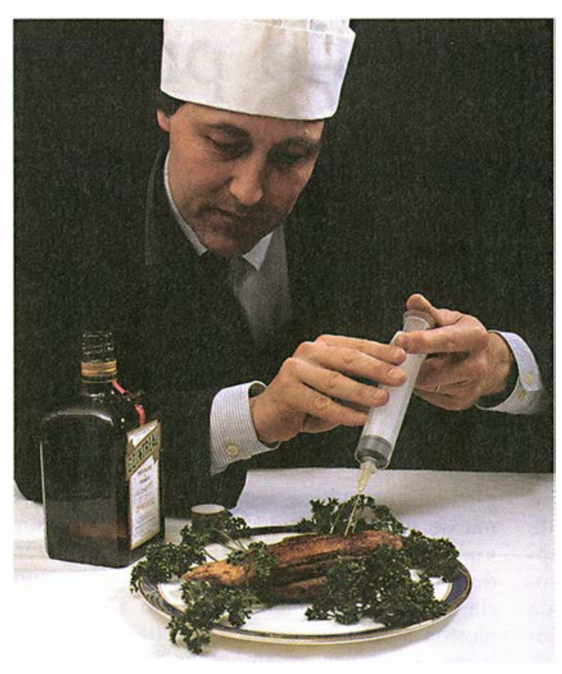
conferencia sobre helados, Barham elaboró una manera de hacer en unos dos minutos tantos, que bastaban para la audiencia entera. La misma receta puede adaptarse a escala doméstica.

Los helados buenos contienen muchas burbujas de aire (para que sean ligeros) y sólo cristales de hielo pequeñitos (así su textura es lisa). El método tradicional bate la mezcla de leche, huevos, azúcar y saboreadores, mientras se enfría lentamente: el batir introduce aire en la mezcla a la vez que va rompiendo los cristales de hielo grandes. Un procedimiento más rápido y eficaz es verter directamente nitrógeno líquido sobre los ingredientes. A 196 grados bajo cero, el nitrógeno líquido congela la mezcla de helado tan deprisa que sólo da tiempo a que crezcan cristales de hielo pequeños. Mientras hierve, crea además una infinidad de pequeñas burbujas de gas. Y por si fuese poco placer, el frío genera una nube de niebla densa, que pone un toque de espectacularidad.

Necesitará volúmenes aproximadamente iguales de nitrógeno líquido y de mezcla para helados o sorbetes. Una vez preparada la mezcla de la manera usual, colóquela en una fuente metálica grande (no use fuentes de cristal o plástico, que pueden romperse con el choque térmico). Observando las medidas de seguridad apropiadas, vierta alrededor de la mitad del nitrógeno líquido y agite suavemente con una cuchara de madera. No deje de agitar mientras siga añadiendo refrigerante, hasta que el helado quede firme. Asegúrese de que ya no humea —lo que querrá decir que todo el nitrógeno se ha evaporado— antes de servirlo.

Por razones de seguridad, use guantes y gafas de protección mientras maneje el gas líquido o cualquier objeto que haya sido expuesto a su frialdad extrema. En segundo lugar, si hace el helado delante de invitados, cerciórese de que están fuera del alcance de las salpicaduras. Podrá conseguir el nitrógeno líquido en las facultades de física o química de la universidad que tenga más cerca, o en un hospital. La mejor manera de transportarlo es con un recipiente de vacío; dura hasta un día.

¿Le apetece una copa tras los postres? Los enológos han contado hasta 500 compuestos que podrían contribuir al carácter de vinos y licores. Los bodegueros envejecen por principio muchos licores y algunos vinos en cubas de roble porque las reacciones químicas con la madera mejoran el gusto de la bebida. La madera contiene celulosa, hemicelulosa, lignina, taninos (productos químicos a menudo astringentes) y moléculas resinosas, entre otros compuestos químicos. Se prefiere para las cubas el roble porque es fuerte e impermeable y no tiene ninguna de las resinas que dan a los vinos de retsina su sabor.



5. EL PATO ASADO PRAVAZ-COINTREAU se prepara empleando un horno corriente y uno de microondas. El primero genera reacciones de tueste sabrosas en la piel. Las microondas actúan en el licor inyectado en el pato, cuyo interior se cocina así rápidamente en un medio con gusto a naranja.

Años atrás Jean-Louis Puech, de Montpellier, mostró que el alcohol etílico de una bebida espirituosa extrae taninos y lignina de su recipiente de madera. Mediante el experimento sencillo de dejar alcohol en un tonel de roble durante más de 10 años, y también macerando trozos de madera en el alcohol, estudió la composición cambiante con el tiempo del líquido y de la madera. La concentración de taninos en ésta decreció un 75 %. Además, los taninos extraídos se habían oxidado, dando una variedad de compuestos saboreadores. La concentración de lignina en la cara interna del barril era un 5 % menor que en la externa. El contenido de celulosa no cambió apenas, pero la hemicelulosa se alteró: se disoció en fructosa, xilosa, arabinosa y glucosa.

Para el gastrónomo molecular, quizás el descubrimiento más significativo sea el de que la vanilina, la principal molécula aromática de la vainilla, constituye un producto final de la degradación de la lignina durante el envejecimiento. El sabor a vainilla lo encontramos en el coñac, el ron y el whisky viejos. Los fabricantes de vinos y licores tienen prohibida por ley la mejora del gusto de sus artículos añadiéndoles azúcar u otras sustancias químicas. Sin embargo, si el consumidor quisiera echar mano de los resultados de la investigación química para elevar la calidad de vinos o bebidas espirituosas inferiores, ¿deberíamos o no animarle a hacerlo? Unas pocas gotas de extracto de vainilla podrían darle a un whisky barato un gusto maravillosamente mejor.

Este tipo de experimento se puede extender a un gran número de bebidas y platos. Puede que en los libros de cocina del futuro las recetas incluyan instrucciones del estilo de "añada a su caldo de carne dos gotas de una solución del 0,001 por ciento de bencilmercaptano en alcohol puro".

La ciencia puede explicar, analizar y ayudar a la creación de nuevos platos. Pero, aunque estamos convencidos de que la ciencia desempeña un papel notable en la gastronomía, creemos también que el científico nunca destronará al cocinero. Las grandes creaciones culinarias serán, como siempre, el resultado de la imaginación artística, sazonada con una mezcla de empirismo y tradición y sólo una cucharada de ciencia. Este sentimiento nos lleva a esperar que Comus, el espíritu protector de los artistas de la cocina, haga que las musas acepten a la ciencia como aliada en la práctica de las artes.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE PHYSICIST IN THE KITCHEN. Nicholas Kurti. *Proceedings of the Royal Institution of Great Britain*, vol. 42, Parte 6, número 199, págs. 451-467; 1969.

ON FOOD AND COOKING: THE SCIENCE AND LORE OF THE KITCHEN. Harold McGee. Macmillan, 1988.

BUT THE CRACKLING IS SUPERB. Dirigido por Nicholas Kurti y Giana Kurti. Institute of Physics Publications, 1988.

THE CURIOUS COOK: MORE KITCHEN SCIENCE AND LORE. Harold McGee. North Point Press, 1990.

LES SECRETS DE LA CASSEROLE. Hervé This. Belin, París, 1993.

Cáncer de próstata

¿Acarrea más riesgos que beneficios el tratamiento agresivo de las etapas iniciales del cáncer de próstata? Esta es una de las cuestiones en cuya resolución deben intervenir médicos y pacientes

Marc B. Garnick

El cáncer de próstata constituye la neoplasia más frecuente de las diagnosticadas (si exceptuamos las cutáneas) entre los varones estadounidenses y es la segunda causa de mortalidad asociada al cáncer (por detrás del cáncer de pulmón). Entre sus víctimas recientes podríamos recordar a Frank Zappa, músico, Joseph Papp, director de teatro, y los actores Telly Savalas y Bill Bixby. La muerte que produce no es precisamente dulce. En los meses finales, la mayoría de quienes sucumben sufren dolores atroces.

Pero el cáncer de próstata, cuya incidencia aumenta con la edad y suele diagnosticarse en mayores de 65 años, ha recibido escasa atención por parte de los investigadores. Y así los médicos carecen de la información necesaria para decidir el tratamiento adecuado. Es, pues, muy plausible que un enfermo a quien se le diagnostique un cáncer de próstata en 1994 descubra que ni siquiera los especialistas coincidan en la acción aconsejable. Médicos y administración se hallan enzarzados en una controversia sobre el tratamiento de la enfermedad, particularmente en los primeros estadios; se disputa incluso si deben tratarse muchos casos curables. Estas y otras cuestiones referentes al cáncer de próstata reclaman una solución urgente, si se quiere atajar el sufrimiento y reducir el número de muertes.

Entenderemos mejor los términos de la polémica en torno al cáncer de próstata si tenemos en cuenta algunas ideas generales de su diagnóstico y tratamiento. Suele detectarse tras el descubrimiento de un bulto en la glándula prostática, estructura en forma de nuez que ayuda a mantener la viabilidad del esperma. Los bultos se detectan durante una revisión rutinaria o en un examen solicitado ante ciertos síntomas, como molestias súbitas al orinar o impotencia. Para examinar la glándula, el médico introduce un dedo en el recto y, palpándola a través de la pared rectal, busca anomalías de tamaño, contorno o consistencia.

Los síntomas que mueven a acudir al médico se presentan cuando una masa cancerosa provoca que la próstata presione sobre las estructuras vecinas. La glándula se halla debajo de la vejiga urinaria y alrededor de la uretra, tubo por donde la orina pasa de la vejiga al pene para su excreción. Si el tumor presiona sobre la vejiga, o pinza la uretra, el paciente se levantará de noche a orinar con una frecuencia anormal o con una gran urgencia; puede provocar también dificultad para iniciar la micción o mantener el flujo de orina.

En algunos casos, el cáncer de próstata se detecta a través de una vía muy distinta, durante el tratamiento de una hiperplasia prostática benigna. Esta condición, agrandamiento de la próstata relacionado con la edad, afecta a más de la mitad de los mayores de 45 años y puede causar los mismos problemas urinarios producidos por un tumor. Si los síntomas se tornan molestos, el cirujano podría aliviarlos con una resección transuretral de la próstata, técnica que elimina partes de la glándula. Siempre que se procede a una resección, se analiza al microscopio el tejido extraído por si hubiera signos neoplásicos.

El análisis de sangre constituye una tercera vía de detección del cáncer de próstata. Puede descubrir la presencia de una neoplasia en individuos sin síntomas de anomalía prostática. Mediante esta prueba, se mide el nivel de antígeno específico de la próstata (AEP), una glucoproteína segregada por la glándula. En casi todas las versiones de la prueba, los niveles superiores a cuatro nanogramos por mililitro de sangre sugieren la posible existencia de cáncer; valores por encima de diez son preocupantes. La mayoría de los tumores detectados mediante la prueba del AEP tienen todavía un tamaño microscópico.

Pero un valor elevado de AEP no constituye una prueba definitiva de cáncer, ya que pueden elevar la concentración de ésta otros factores: desarrollo de una hiperplasia prostática benigna, inflamación de la próstata (prostatitis) y aplicación de una presión mecánica sobre la glándula. Y a la inversa, en muchos varones con cáncer es normal el nivel de AEP cuando se establece el diagnóstico.

Pese a las limitaciones de la prueba, se trata, por su sencillez y bajo coste, de una técnica habitual para la detección de cáncer en varones asintomáticos. A su generalización se debe buena parte del notable aumento del número anual de casos de cáncer de próstata que se están diagnosticando.

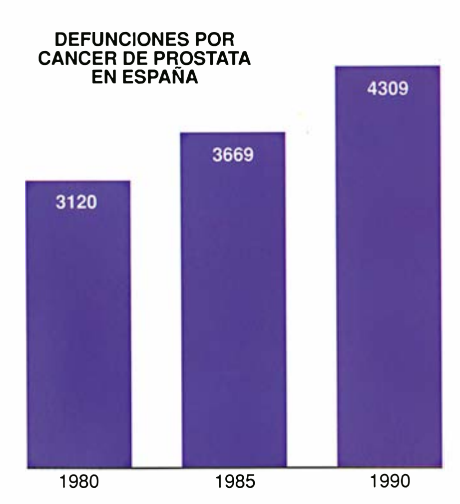
Ese crecimiento ha avivado el debate sobre la necesidad de seleccionar los pacientes con tumores pequeños y someterlos a un tratamiento agresivo inmediato para curarlos. El nudo de la controversia reside en que no hay forma de distinguir entre los cánceres microscópicos que permanecerán latentes (sin producir síntomas durante la vida del paciente) y los que adquirirán importancia clínica (progresando lo suficiente como para provocar síntomas o amenazar la vida). Los médicos pueden conjeturar su virulencia examinando su tamaño y aspecto microscópicos, entre otras características tumorales, pero no pueden determinar con certeza, cuando los tumores están en una fase inicial, cuáles necesitan tratamiento y cuáles no.

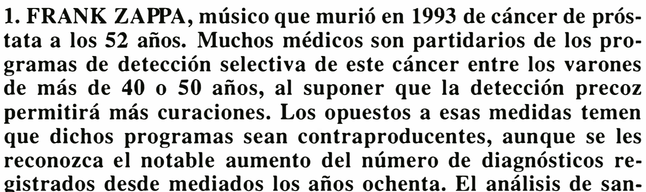
MARC B. GARNICK profesa en el Instituto Oncológico Dana-Farber, adscrito a la Universidad de Harvard. Allí atiende a los enfermos con neoplasia genitourinaria.

El progreso experimentado por las técnicas de identificación de tumores pequeños ha encendido la polémica porque puede llevar a la aplicación de terapias arriesgadas en muchísimos que habrían muerto con cáncer de próstata, pero no a causa del mismo. Las autopsias de quienes fallecieron por otros motivos indican que alrededor de un tercio de los mayores de cincuenta años tiene al menos algunas células cancerosas en la próstata y que la incidencia aumenta linealmente después de cumplidos los cincuenta años (de modo que el 90 % de los mayores de 90 años está afectado). Sin embargo, la mayoría de los que desarrollan un cáncer de próstata no muere a consecuencia del mismo. Algunos expertos se inclinan por reducir al mínimo el número de varones sometidos a un tratamiento innecesario; otros temen que la falta de campañas de detección selectiva y de tratamiento produzca una muerte cruel a millares de personas que podrían salvarse.

Por supuesto, nunca se establece un tratamiento atendiendo sólo a los resultados de la prueba del AEP o al descubrimiento de un bulto. La detección de un cáncer es sólo el primer paso para el diagnóstico. Cuando un tacto rectal o un nivel elevado de AEP despierta la sospecha de un cáncer, los médicos suelen continuar con una ecografía. A menudo, esta técnica acota la localización del tumor y facilita el paso siguiente: la biopsia de próstata y el estudio microscópico del tejido sospechoso.

Si el microscopio confirma la pre-




1. FRANK ZAPPA, músico que murió en 1993 de cáncer de próstata a los 52 años. Muchos médicos son partidarios de los programas de detección selectiva de este cáncer entre los varones de más de 40 o 50 años, al suponer que la detección precoz permitirá más curaciones. Los opuestos a esas medidas temen que dichos programas sean contraproducentes, aunque se les reconozca el notable aumento del número de diagnósticos registrados desde mediados los años ochenta. El análisis de sangre lleva a menudo a descubrir tumores microscópicos, muchos de los cuales no evolucionarán. De ahí que, según opinan los escépticos, un incremento en el número de personas exploradas podría traducirse en tratamientos arriesgados en multitud de varones que habrían estado mejor sin ellos. A la izquierda se ofrecen los datos sobre defunciones por cáncer de próstata en España, en un cuadro facilitado por Rosa Gómez Redondo, de la Universidad Nacional de Eduación a Distancia.

sencia de una neoplasia, se determina su estadio de desarrollo, toda vez que las pautas actuales de tratamiento descansan en el estado de progresión de la enfermedad. Aunque los sistemas de clasificación varían, suelen dividirse los tumores en cuatro estadios indicados por letras. Los estadios A, B y C corresponden a cánceres que no han dado lugar a metástasis, o sea, no han generado nuevas colonias tumorales en otros tejidos. El estadio D consiste en tumores que ya han producido metástasis. El cáncer de próstata se extiende primero a los ganglios linfáticos situados debajo de la glándula prostática; luego aparece en los huesos y otros órganos.

Los tres primeros estadios se distinguen en razón del tamaño de los tumores. Microscópicos en estadio A, suelen corresponder a los que se descubren por resección transuretral; estas neoplasias se dividen en dos subclases: A1 y A2. Los tumores en estadio A1 están confinados a un área pequeña de la próstata y compuestos por tejido bien diferenciado; es decir, las células cancerosas, pese a algunas anomalías obvias (núcleos más grandes), son de tamaño uniforme y están densamente empaquetadas. Los cánceres en estadio A2, más difusos, presentan un tejido cuyo grado de diferenciación es de escaso a moderado, o exhiben ambas características. La aparición tumoral en múltiples zonas de la glándula prostática o su escasa diferenciación son signos de un comportamiento probablemente más agresivo del cáncer.

Las neoplasias en estadio B son palpables (de tamaño suficiente para percibirse como un nódulo durante el tacto rectal), pero rara vez causan molestias. Los tumores en estadio C se han extendido ya por la glándula, que adquiere la dureza de una piedra; se proyectan más allá de los confines de la próstata. En los pacientes con neoplasias en estadio C el diagnóstico llega cuando los síntomas urinarios obligan a acudir al médico.

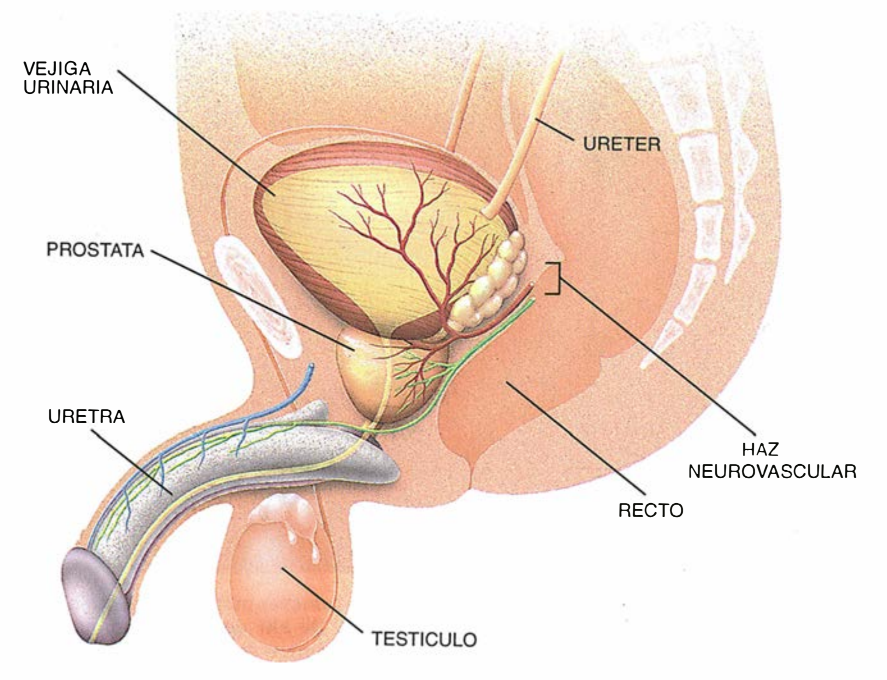
Para determinar en qué estadio se halla un tumor, se conjuga la información obtenida en el tacto rectal, la ecografía y la biopsia con la proporcionada por otras pruebas no invasoras (verbigracia, una tomografía computerizada del abdomen y la pelvis por si hubiera indicios de cáncer en los ganglios linfáticos). La experiencia nos dicta que el cáncer en ganglios denuncia la existencia de cáncer en otros lugares. Puede acometerse también otra prueba de barrido capaz de descubrir depósitos metastáticos en los huesos. Sobre la información recabada se asigna un estadio provisional al tumor.

Las pruebas diagnósticas quizá no acaben ahí. Del 25 % al 50 % de los tumores clasificados de entrada en los estadios A2, B o C resultan ser, al realizar más pruebas, cánceres metastáticos en estadio D (el porcentaje de tumores en estadio A1 es mucho menor). El descubrimiento de metástasis encierra el mayor interés: el enfoque terapéutico de estas neoplasias difiere del empleado para el tratamiento de los tumores menos avanzados. Para determinar el estadio con más precisión se procede al análisis directo del tejido glandular, obtenido de una biopsia o extracción de ganglios linfáticos de la pelvis. Pero esta técnica de determinación quirúrgica del estadio tumoral no detecta células cancerosas dispersas que hayan pasado a la circulación y se hayan alojado en los huesos; pacientes tratados como si se hallaran en una fase precoz de la enfermedad podrían sufrir, en realidad, un cáncer metastático.

Se aconseja el tratamiento inmediato de la mayoría de los pacientes con enfermedad en estadio A o B (a excepción, tal vez, de los de edad avanzada con estadio A1) a través de dos opciones terapéuticas, de eficacia pareja: extirpación de la próstata (prostatectomía radical) o irradiación para destruir las células cancerosas de su interior. Prefiérese la radioterapia en quienes no resisten la intervención quirúrgica.

Se opta por la radioterapia cuando la enfermedad se halla en el estadio C, porque la cirugía no puede erradicar los tumores que hayan escapado de los límites de la glándula prostática. Se sabe también que ni la cirugía ni la radioterapia curan la enfermedad en estadio D, o metastática. Por tanto, en los individuos con un cáncer tan avanzado es más útil una terapia sistémica contra el avance de los depósitos metastáticos y para alivio del dolor y otros síntomas.

Durante medio siglo se intentó detener la progresión del cáncer avanzado con terapia hormonal. Basábase esa idea en el descubrimiento que le valió el Nobel a Charles B. Huggins: las hormonas masculinas (andrógenos) aceleran el crecimiento del cáncer de próstata y su desaparición lo retarda. Los niveles de andrógenos del organismo caen por extirpación de los testículos, órganos donde se sintetiza el 95 por ciento de la testosterona, la principal hormona masculina. Además de esa orquiectomía bilateral, se recurre, para rebajar el nivel de andrógenos, a la administración de fármacos (estrógenos, por ejemplo) que se oponen a las acciones o la síntesis de andrógenos. La mayoría de los tumores metastáticos se tornan resistentes a la terapia hormonal, después de lo cual progresan rápidamente. Los pa-



2. PROSTATA, glándula en forma de nuez (*centro*) situada por debajo de la vejiga urinaria y alrededor de la uretra. Muchos hombres no saben de la existencia de esta glándula hasta que un cáncer o un aumento de su tamaño relacionado con la edad provoca anomalías urinarias o, en algunos casos, dificultades de la erección.

Tratamientos habituales del cáncer de próstata

El tratamiento del cáncer de próstata depende del estadio en que se encuentre la enfermedad. Las recomendaciones que se siguen en Estados Unidos se muestran en la columna de la derecha. La terapia agresiva —radiación o prostatectomía (extirpación quirúrgica de la próstata)— en los estadios A y B de la enfermedad es cada vez más controvertida, porque algunos datos sugieren que al eludir el tratamiento no se atenta contra la duración ni contra la calidad de vida de ciertos pacientes.

ESTADIO DE LA ENFERMEDAD		TRATAMIENTO ESTANDAR
ESTADIO A CANCER MICROSCOPICO DENTRO DE LA GLANDULA PROSTATICA	**A1** El cáncer, bien diferenciado, se halla confinado a una zona	Observación, radioterapia o prostatectomía radical
	A2 Hay cáncer en muchas localizaciones o su diferenciación es de moderada a escasa	Radioterapia o prostatectomía radical
ESTADIO B BULTO PALPABLE DENTRO DE LA GLANDULA PROSTATICA	**B1** El cáncer forma un nódulo pequeño y discreto en un lóbulo de la glándula **B2** El cáncer forma un nódulo grande o múltiples nódulos, afecta a ambos lóbulos o está moderada o escasamente diferenciado	Radioterapia o prostatectomía radical
ESTADIO C UNA GRAN MASA QUE AFECTA A TODA LA GLANDULA PROSTATICA	**C1** El cáncer se presenta como una masa continua que puede haberse extendido algo más allá de los límites de la glándula **C2** Cáncer de mayor tamaño que se presenta como una masa continua que ha invadido las estructuras circundantes de la glándula	Radioterapia; algunos médicos administran hormonoterapia con radioterapia
ESTADIO D TUMOR METASTATICO	**D1** El cáncer aparece en los ganglios linfáticos de la pelvis **D2** El cáncer afecta a tejidos situados más allá de los ganglios	Terapia hormonal una vez aparecidos los síntomas (o posiblemente en cuanto se aprecien depósitos metastáticos) y terapia paliativa del dolor y de otras molestias

cientes mueren 2 a 5 años después del descubrimiento de las metástasis.

Hay acuerdo en adoptar las estrategias al uso cuando la enfermedad se encuentra en los estadios C y D. Pero aumenta la discrepancia sobre el tratamiento adecuado para los estadios A y B, y se discute también la conveniencia o no de realizar programas masivos de detección selectiva de tumores en una fase precoz. El conflicto surge, en parte, por el riesgo que conlleva el tratamiento. Aunque los porcentajes de complicaciones publicados varíen, es innegable que la radioterapia y la cirugía pueden producir impotencia, incontinencia, lesión intestinal y la muerte.

Las complicaciones derivadas de la cirugía disminuyen cuando realiza la intervención un equipo experimentado en la técnica de conservación nerviosa que introdujo Patrick C. Walsh, a comienzos de los ochenta. En dicho procedimiento se evita cortar dos haces de nervios y vasos sanguíneos, adosados a la superficie de la glándula prostática y necesarios para la erección. La técnica reduce la hemorragia y facilita la reconexión de la uretra a la vejiga después de su separación durante el acto quirúrgico.

Los defensores de los programas de detección selectiva y del tratamiento inmediato de los tumores precoces son conscientes de los riesgos asociados al tratamiento agresivo. Igual que los adversarios de tales medidas, están preocupados por la falta de métodos que permitan discriminar entre pacientes con tumores no dolorosos (sin necesidad de intervención) y aquellos cuyos cánceres progresarán hacia estadios avanzados. Pero consideran justo que los pacientes con posibilidades de evitar los horrores de la enfermedad metastática tengan la oportunidad de intentarlo; piensan en los pacientes asintomáticos y con tumores pequeños confinados a la glándula prostática. Para encontrar a tales personas, aducen, hay que realizar pruebas de detección selectiva.

Dados los riesgos y los costes, los partidarios de la terapia agresiva se dividen cuando se trata de decidir qué grupos de edad deben someterse a esas pruebas y a los consiguientes tratamientos. Unos excluirían a los mayores de 70 años, fundados en la idea de que es probable que mueran de otras causas. Otros, más flexibles, harían una búsqueda activa y los incluirían si esos pacientes gozaran de buena salud.

La mayoría de los defensores de la terapia invasiva para las etapas iniciales de la enfermedad (y algunos de los escépticos respecto de sus beneficios) se inclinarían por el tratamiento de los pacientes de cuarenta a sesenta años, incluyendo a quienes sufrieran neoplasias microscópicas diferenciadas. En primer lugar, algunos datos sugieren que el cáncer de próstata es más agresivo en los hombres jóvenes. En segundo lugar, aunque se desarrollara un tumor de crecimiento lento en éstos, hay muchas posibilidades de que vivan lo bastante como para ver el progreso y la aparición de metástasis de sus tumores.

Uno de mis pacientes del Instituto Oncológico Dana-Farber coincidiría con los partidarios del tratamiento: le diagnosticaron cáncer de próstata cuando tenía 72 años, después de comprobar niveles ligeramente elevados de AEP en dos pruebas realizadas con un intervalo de un año. La biopsia de la próstata indicó la presencia de un solo grupo de células cancerosas. Tras una biopsia de ganglios linfáticos y otras pruebas, se consideró que no presentaba metástasis. Deseoso de verse libre del cán-

BIEN DIFERENCIADO

1 Células glandulares (secretoras), pequeñas, bastante uniformes y muy empaquetadas.

2 Las células exhiben formas más variadas e irregulares y el empaquetamiento es menos denso.

MODERADAMENTE DIFERENCIADO

3 El tamaño y la forma de las células son aún más irregulares y las células están más dispersas; algunas están fusionadas y los bordes celulares son menos claros

ESCASAMENTE DIFERENCIADO

4 Muchas células están fusionadas en masas irregulares; algunas células (*sombreado oscuro*) han comenzado a invadir el tejido conjuntivo que separa las células

5 La mayor parte del tumor está constituido por masas irregulares que han invadido el tejido conjuntivo

3. FORMA, TAMAÑO Y DISPOSICION de las células cancerosas de la glándula prostática; su examen proporciona pistas sobre la virulencia del tumor. Se cree que los tumores bien diferenciados (*dos paneles superiores*), los que más se parecen al tejido glandular normal, tienen un comportamiento menos agresivo que los tumores menos organizados y con una diferenciación moderada (*panel central*) o escasa (*dos paneles inferiores*). Según el esquema de gradación reflejado arriba (sistema de Gleason), el grado de diferenciación se indica por un valor numérico que va de 1 a 5. La puntuación del patrón predominante suele añadirse al del siguiente modelo prevalente para obtener una puntuación final de Gleason que va de 2 a 10.

cer, se sometió a una prostatectomía radical, de la que se restableció. Cuando le vi por última vez no había recuperado todavía la actividad sexual que, aunque moderada, tenía antes de la cirugía, pero seguía satisfecho de su decisión.

Sin embargo, alguien podría aducir que este paciente nunca debiera haberse tratado. Los contrarios a la terapia precoz esgrimen el incremento desorbitado del número de prostatectomías realizadas entre 1984 y 1990, muchas de ellas en mayores de 70 años. E insisten en que no hay pruebas de que la terapia agresiva en las primeras fases evite el desarrollo de tumores metastáticos y salve vidas. Estando así las cosas, temen que dicho tratamiento, dirigido a evitar una posibilidad que tal vez nunca se materialice, esto es, la aparición de metástasis óseas, esté condenando a muchos a años de impotencia, incontinencia y otras inconveniencias.

Sostienen además que, aun cuando se consiguiera la curación, los efectos colaterales del tratamiento superarían los beneficios de la prolongación de la vida. Por consiguiente, si el tratamiento es indeseable, los programas de detección selectiva de signos de cáncer de próstata en varones asintomáticos son innecesarios.

En el grupo de los escépticos milita otro de mis pacientes, un hombre de negocios de 51 años y sexualmente activo que fue sometido a una prostatectomía radical, conservadora de la inervación, después de que pruebas quirúrgicas y no invasivas demostraran la existencia de un cáncer microscópico diseminado por toda la glándula prostática (enfermedad en estadio A2). Tras la intervención, esperaba el retorno de la función eréctil, sabiendo que en torno al 70 % de los varones de su mismo grupo de edad, inicialmente potentes y sometidos a la misma técnica quirúrgica, recuperaban dicha función en el intervalo de un año.

Por desgracia, 18 meses después no había recobrado su capacidad de erección. Muy preocupado, probó con la inyección peneana de vasodilatadores, pero no dio resultado en su caso. Pese a la ayuda psicológica, ha tenido brotes de depresión profunda. Se pregunta si tomó la decisión correcta al someterse a la intervención.

Suelen citarse tres artículos recientes para oponerse al tratamiento invasivo de la enfermedad localizada. Uno lo publicó en 1992 el equipo de Jan-Erik Johansson, del Hospital Örebro, de Suecia. Hicieron un seguimiento de 223 pacientes (con una edad media de 72 años en el momento del diagnóstico) que tenían cáncer de próstata localizado (en los estadios A o B) y cuyo tratamiento consistió en una "espera vigilante". Es decir, se les aplicó una terapia (como la resección transuretral) para los síntomas urinarios y otras molestias, pero no recibieron ningún tratamiento más hasta la aparición de las metástasis, momento en el que se les administró hormonoterapia. Al cabo de 10 años habían muerto 124 sujetos, pero sólo en 19 (un 8,5 por ciento de los 223) la causa se imputó al cáncer. El índice de supervivencia era comparable al de pacientes que reciben un tratamiento agresivo.

Otro estudio favorable a la "espera vigilante" lo publicaron en 1993 Craig Fleming y colegas suyos del Grupo de Investigación de Enfermedades de la Próstata (PPORT). Los autores, procedentes de varios hospitales clínicos, utilizaron los resultados de tratamiento aparecidos en la bibliografía médica para calcular los riesgos y los beneficios derivados del tratamiento en mayores de 60 años. Se proponían averiguar si la disminución de la calidad de vida consecutiva a la terapia en los estadios A y B quedaba compensada con la prolongación de la vida.

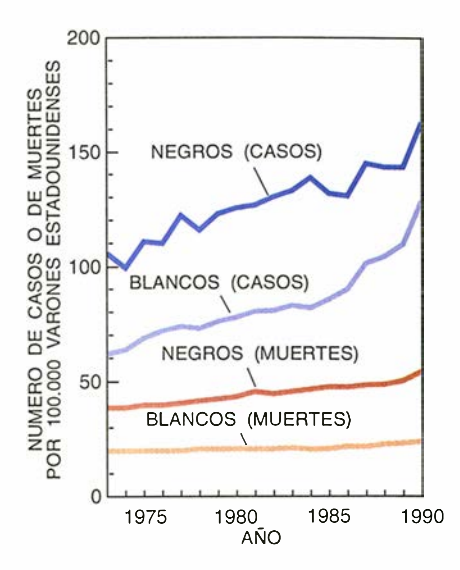
El grupo PPORT llegó a la conclusión de que, para los pacientes con tumores bien diferenciados, el tratamiento ofrecía escasos beneficios con respecto a la "espera vigilante". También determinaron que, para los pacientes con tumores moderada o escasamente diferenciados, el tratamiento valdría la pena, al proporcionar hasta 3,5 buenos años de vida en determinadas circunstancias, pero ningún beneficio si las circuns-

tancias cambiaban. Aseguraban también la improbabilidad de “que los pacientes de 75 años o mayores saquen provecho de la radioterapia ni de la prostatectomía radical en comparación con la ‘espera vigilante’”.

El tercer estudio apareció a comienzos de este año. Lo firmó el equipo encabezado por Gerald W. Chodak, de la Universidad de Chicago. Analizaron los datos derivados de seis ensayos en los que varones con cáncer localizado (en estadios A o B) no recibieron una terapia inmediata. El tratamiento agresivo de estos sujetos se traducía en una menor mortalidad consecutiva al cáncer después de 10 años; sin embargo, la diferencia parece ser pequeña. Además, observa el equipo, es posible que el tratamiento agresivo “tenga un efecto adverso sobre la calidad de vida”.

Estos estudios, aunque estimulantes, adolecen de defectos importantes y, por tanto, sus resultados distan de ser definitivos. Así, en el trabajo del grupo sueco no se realizó una selección aleatoria de todos los pacientes. Muchos se escogieron específicamente porque tenían tumores bien diferenciados. Además, un número desproporcionado de sujetos era mayor o tenía otras afecciones graves. Por consiguiente, las conclusiones sacadas no pueden aplicarse a pacientes con tumores moderada o escasamente diferenciados, a personas jóvenes o a las que, a excepción del cáncer de próstata, estén sanos. Se ha criticado el estudio de Chicago por referirse fundamentalmente a pacientes de edad avanzada, lo que pone en tela de juicio su aplicabilidad a individuos más jóvenes.

Las conclusiones de Fleming son problemáticas también. Al menos algunos de los pacientes identificados como pertenecientes al grupo de “espera vigilante” no habían quedado sin tratamiento, sino que habían recibido hormonoterapia en las primeras etapas de la enfermedad. Dicha terapia no constituye un tratamiento habitual de los estadios A o B de la enfermedad, pero tampoco equivale a ausencia de tratamiento. En efecto, hay razones para pensar que la hormonoterapia administrada al principio del curso de evolución del cáncer de próstata puede ser beneficiosa. Además, sólo se seleccionaron hombres sexualmente activos, para quienes la impotencia significaría una mayor reducción de la calidad de vida que para los no activos. De ahí que la decisión de concentrarse en varones con actividad sexual haya introducido probablemente un sesgo en contra del tratamiento en los resultados. Así pues, los beneficios que el grupo PPORT atribuye a la “espera vigilante” quizá son menores de lo que se pretende. En efecto, una interpretación acrítica de los hallazgos podría llevar a muchos que necesitan tratamiento a optar por la “espera vigilante” y perder así la oportunidad de curarse.



4. DATOS del Instituto Nacional del Cáncer, según los cuales la probabilidad de que los varones estadounidense de raza negra (*líneas oscuras*) padezcan cáncer de próstata y mueran por su causa es mayor que la de sus compatriotas blancos (*líneas claras*).

De algunos estudios recientes se desprende que la prueba del AEP no detecta fácilmente los tumores asintomáticos; no se traduciría, pues, en el diagnóstico de cáncer en millones de varones que albergan cánceres microscópicos quiescentes. Señalemos los datos recogidos por William J. Catalona, según los cuales alrededor del 90 % de los cánceres descubiertos gracias a la prueba del AEP son difusos o su diferenciación es de moderada a escasa (características que se han asociado a cierto grado de virulencia). Vale la pena explorar este hallazgo más a fondo, pues quizá signifique que la prueba del AEP revela la existencia de cánceres que precisan atención médica.

En ausencia de datos que corroboren, sin ambages, que la espera vigilante constituye una alternativa inocua al tratamiento, yo me sentiría incapaz de decir a un paciente con un cáncer potencialmente curable que la intervención activa es inadecuada. Podría yo tomar en consideración el seguimiento de un paciente de edad avanzada con un tumor en estadio A1 y no intervendría hasta

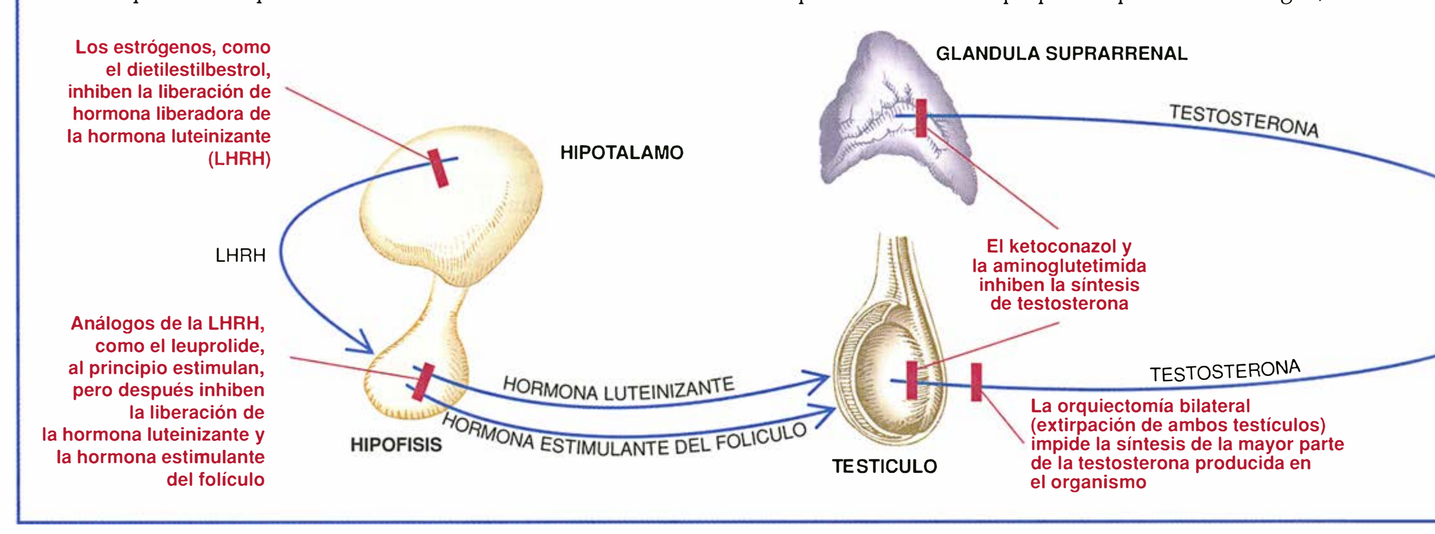
Riesgos del tratamiento agresivo

Un porcentaje elevado de pacientes que se someten a un tratamiento agresivo (radioterapia o cirugía) para el cáncer de próstata localizado sufren complicaciones, según datos recogidos en la bibliografía médica reciente (*dos filas superiores*). El porcentaje de complicaciones derivadas de la intervención quirúrgica puede ser aún mayor cuando se acomete un seguimiento de los pacientes (*entre paréntesis*), como hizo el grupo de Floyd J. Fowler, Jr. Los riesgos quirúrgicos (*tercera fila*) suelen disminuir, sin embargo, si los enfermos son relativamente jóvenes, la extensión de sus tumores es mínima y la intervención corre a cargo de un equipo experimentado que aplica los procedimientos conservadores de la inervación introducidos por el equipo de Patrick C. Walsh.

	PORCENTAJE DE FALLECIMIENTOS POR LA TERAPIA	PORCENTAJE DE IMPOTENCIAS	PORCENTAJE DE PACIENTES CON INCONTINENCIA LIGERA O GRAVE
RADIOTERAPIA	<0.1	30–60	0–2
CIRUGIA	0.6	30–50 (*70 o más*)	2–15 (30)
CIRUGIA EN INSTITUCIONES SELECTAS	0.1	20–30	Grave: 0 Ligera: 4–7

Opciones para la terapia del cáncer de próstata avanzado

Las diversas terapias (*rojo*) empleadas en los casos de cáncer de próstata metastático (estadio D) y en determinados estadios C comparten un mismo objetivo: la interrupción (*barras rojas*) de las vías biológicas (*flechas azules*) responsables de la síntesis de testosterona y de su acción en las células de la próstata (*extremo de la derecha*). Ese bloqueo evita que la testosterona active el crecimiento de tumores derivados de células prostáticas cancerosas; puede incluso reducir el tamaño de los tumores (al menos durante algún tiempo). Estudios recientes sugieren que la administración simultánea de dos agentes terapéuticos (como leupramide y flutamide) es a menudo más eficaz que la administración de sólo uno. El fármaco finasteride, tomado por afectos de hiperplasia prostática benigna,



tener indicios de que el cáncer se estuviera activando. Pero no veo pruebas de que el negar el tratamiento a otros pacientes con la enfermedad localizada sea el curso ideal de acción. Comparto con mis pacientes el temor de que puedan desarrollar metástasis óseas.

Por esta razón me incluyo en el grupo de los que recomiendan los exámenes rutinarios propuestos por la Sociedad Americana del Cáncer. Esta sociedad indica que los varones mayores de 40 años sin síntomas de cáncer prostático se sometan a un tacto rectal anual y que los mayores de cincuenta se hagan una prueba AEP, en tanto que los hombres en situación de riesgo (como los que tienen antecedentes familiares de la enfermedad) se sometan a estas pruebas más jóvenes.

Debo advertir, sin embargo, que el Instituto Nacional del Cáncer (INC) recomienda tan sólo el tacto rectal a partir de los 40 años y está evaluando la utilidad de la prueba del AEP para detectar este cáncer. En Europa son muchos los médicos que sienten poco entusiasmo por esta prueba. Aunque yo sea partidario de los exámenes rutinarios, importa que los pacientes sean informados de los riesgos y los beneficios del tratamiento antes de someterse a la prueba del AEP. Quienes de antemano renunciaran a un tratamiento agresivo en caso de enfermedad localizada podrían no realizársela.

El tratamiento de los estadios A y B no es el único foco de polémica. Otro debate, más tranquilo, gira en torno al uso de terapias experimentales para enfermedades en estadio D. El desacuerdo se ilustra mejor a través de la experiencia de un tercer paciente mío, que tenía 65 años cuando se le diagnosticó un cáncer de próstata muy extendido. Entonces, año 1987, el tratamiento acostumbrado consistía en la orquiectomía bilateral y la administración del estrógeno dietilestilbestrol (DES) o de análogos de la hormona hipotalámica LHRH (del inglés *luteinizing hormone-releasing hormone*, hormona liberadora de hormona luteinizante). Mis colaboradores y yo mismo acabábamos de demostrar que los análogos de la LHRH eran tan eficaces como el DES y tenían efectos secundarios más suaves.

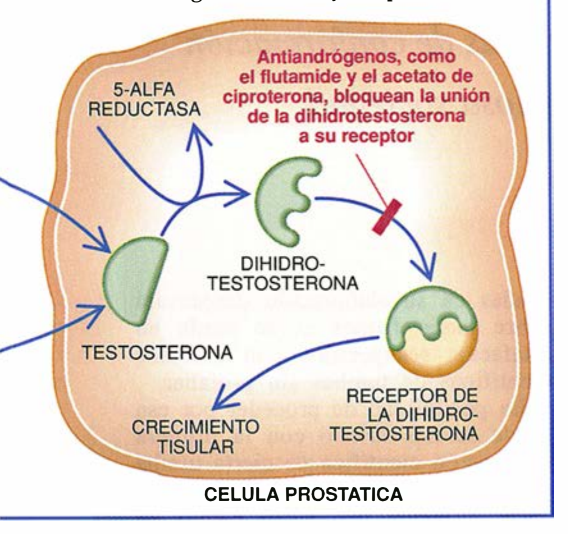
También pude ofrecerle una terapia experimental prometedora: un análogo de la LHRH combinado con flutamide, un antiandrógeno en fase experimental. Aunque la opinión predominante sostenía que la combinación de hormonoterapias no añadía beneficio alguno, los datos preliminares a los que yo tenía acceso indicaban que la combinación experimental bien podría prolongar el período de supervivencia. Sabía también cómo obtener el fármaco en fase experimental y dispuse del permiso para usarlo.

Por una cuestión de autoestima, mi paciente no quería que se le extirparan los testículos. Cifró todas sus esperanzas en la farmacoterapia combinada. Entre abril de 1987 y mediados de 1991, su enfermedad metastática casi desapareció. Como le habría ocurrido con cualquier otro tratamiento que hubiera elegido, se volvió impotente. Perdió interés por el sexo y tenía menos intimidad física con su mujer. Pero parecía aceptar este bajón y se mantuvo bien en las demás actividades. De hecho, la intimidad emocional con su mujer aumentó.

En 1991 el cáncer se hizo resistente al tratamiento hormonal. En los últimos cuatro meses de vida, sufrió muchas complicaciones derivadas del cáncer de próstata: intensos dolores óseos, pérdida de peso, debilidad muscular, incapacidad para andar y estreñimiento causado por los narcóticos que necesitaba para mitigar los dolores. Murió 54 meses después de establecido el diagnóstico, habiendo sobrevivido mucho más de los de 18 a 24 meses que hubieran sido imaginables (dada la extensión de su enfermedad) de haber seguido la terapia al uso.

Es muy posible que el tratamiento experimental fuera responsable de su prolongada supervivencia. Esta posibilidad pone sobre el tapete la cues-

interrumpe esa misma vía. En las células prostáticas impide que la enzima 5-alfa reductasa convierta la testosterona en dihidroxitestosterona. Aunque su eficacia en el cáncer de próstata no está demostrada, se investiga en su empleo preventivo.



tión de si todos los pacientes desahuciados deben tener acceso a tratamientos nuevos y prometedores, como ocurre con los enfermos de sida. En el caso de mi paciente, los alentadores datos preliminares sobre el tratamiento combinado recibieron un respaldo posterior. Hoy goza ya de la aprobación gubernamental y su uso se ha generalizado. Sin embargo, por cada caso en el que los datos preliminares acaban confirmándose, hay otro en el que un tratamiento inicialmente prometedor acaba siendo inútil o incluso perjudicial. Existe también el riesgo de que el permitir un acceso prematuro a los fármacos se convierta en obstáculo para la realización de grandes ensayos aleatorios de dos tipos de tratamiento, el experimental y el estándar. La ausencia de estos ensayos prospectivos, realizados al azar, dificulta los esfuerzos para valorar la seguridad y la eficacia de nuevos tratamientos.

Cuando hay personas que mueren y cuando los tratamientos existentes son inadecuados, esperar a que se realicen los estudios perfectos no parece lo ideal. Se hace necesario descubrir un terreno intermedio, en el que la administración se muestre flexible y médicos y pacientes sean informados de los hallazgos preliminares. Al mismo tiempo, hay que animar a los laboratorios farmacéuticos a que faciliten el acceso a las drogas a los pacientes con enfermedades de pronóstico ominoso, a la vez que se aseguran una continua retroinformación sobre la eficacia y los efectos colaterales.

El rechazo de mi paciente por la orquiectomía, junto con la desesperación de un hombre de 51 años ante su impotencia, pone de manifiesto otra deficiencia del tratamiento actual. Como las mujeres que padecen cáncer de mama saben demasiado bien, el sistema médico suele dejar de lado el efecto psicológico que ejerce la amenaza contra la propia imagen y la actividad sexual. El hombre que ha de enfrentarse con el sacrificio de su potencia sexual para conseguir unos años de vida extra debe recibir el adecuado apoyo emocional.

Los tres pacientes aludidos son de raza blanca. En el caso de los varones de raza negra surgen otras cuestiones relacionadas con el tratamiento. Es posible que los estadounidenses negros ostenten la mayor incidencia mundial de cáncer de próstata y su probabilidad de morir de esta enfermedad doble la de sus compatriotas blancos. Se han propuesto muchas explicaciones, pero ninguna se ha demostrado. Hay algunos indicios de que los universitarios de raza negra tienen niveles más elevados de andrógenos en sangre; ¿podrían esos elevados niveles contribuir a una mayor frecuencia de este cáncer? ¿Fallecen antes los norteamericanos de raza negra debido a su menor acceso a la atención médica? ¿O ello tiene que ver con el hecho de que tardan más en acudir al médico, cuando su enfermedad ha progresado hasta un estadio avanzado? ¿Se trata simplemente de que el cáncer de próstata es más agresivo en estos individuos o responde peor a la terapia? ¿Disponen acaso de menos oportunidades de ensayar tratamientos en fase de investigación?

Hay que investigar mucho más las causas que dan origen al cáncer de próstata para evitarlas. Es también crucial identificar los factores que estimulan el crecimiento rápido de los tumores quiescentes en algunos individuos. El descubrimiento de esos factores y la identificación de las anomalías moleculares que sirven de aviso y acompañan la transición a la agresividad, ayudaría a distinguir los pacientes que se beneficiarían de un tratamiento vigoroso de los que no lo harían. Los médicos necesitan además vías que permitan reconocer la presencia de metástasis microscópicas y poder así adecuar el tratamiento al estadio de la enfermedad. Y la investigación sobre las causas de la resistencia hormonal es imprescindible para mejorar la salud y prolongar la vida de los pacientes con enfermedad metastática.

La investigación clínica debe desarrollarse también. La única forma de determinar si los programas de detección selectiva del cáncer de próstata tienen sentido, si los beneficios del tratamiento agresivo superan sus riesgos y si la radioterapia y la prostatectomía son igual de eficaces estriba en abordar ensayos clínicos generalizados y a largo plazo, en los que pacientes comparables sean asignados aleatoriamente a condiciones experimentales diferentes. Debe resolverse si, como parece, la hormonoterapia puede prolongar la vida cuando se aplica a pacientes con enfermedad metastática en una fase precoz en que todavía no produce síntomas. En paralelo a esos estudios, debe ampliarse la investigación de nuevos enfoques de tratamiento. Debemos, por último, llegar a un fundado consenso. Sólo entonces alcanzaremos la meta compartida por todos los participantes en la batalla sobre la conveniencia o no de realizar exámenes rutinarios masivos y los tratamientos: un notable aumento del período de supervivencia y de la calidad de vida disfrutada por los varones afectados por un cáncer de próstata.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HIGH 10-YEAR SURVIVAL RATE IN PATIENTS WITH EARLY, UNTREATED PROSTATIC CANCER. Jan-Erik Johansson y cols. en *Journal of the American Medical Association*, volumen 267, n.º 16, págs. 2191-2196; 22/29 de abril de 1992.

PROSTATE CANCER: SCREENING, DIAGNOSIS AND MANAGEMENT. Marc B. Garnick en *Annals of Internal Medicine*, vol. 118, número 10, páginas 804-818; 15 de mayo de 1993.

A DECISION ANALYSIS OF ALTERNATIVE TREATMENT STRATEGIES FOR CLINICALLY LOCALIZED PROSTATE CANCER. C. Fleming, J. H. Wasson, P. C. Albertsen, M. J. Barry y J. E. Wennberg en *Journal of American Medical Association*, volumen 269, n.º 20, págs. 2650-2658; 26 de mayo de 1993.

THE PROSTATE-CANCER DILEMMA. Charles C. Mann en *Atlantic Monthly*, volumen 272, número 5, páginas 102-118; noviembre de 1993.

RESULTS OF CONSERVATIVE MANAGEMENT OF CLINICALLY LOCALIZED PROSTATE CANCER. Gerald W. Chodak y cols. en *New England Journal of Medicine*, volumen 330, n.º 4, págs. 242-248; 27 de enero de 1994.

Objetos de metales preciosos del Sicán medio

Hubo una cultura peruana, anterior a la inca, que desarrolló un tratamiento original del oro y otros metales. El estudio de las técnicas de conformación metálica del Sicán nos introduce en esa misteriosa sociedad

Izumi Shimada y Jo Ann Griffin

Máscaras ceremoniales y cuchillos, fabricados en oro, son símbolos de la cultura peruana prehispánica. Hoy sirven para adornar cubiertas de libros sobre el país y se han convertido en emblema de instituciones oficiales. Aunque los propios especialistas atribuyen a veces estos objetos de metales preciosos a los incas o a sus rivales costeros, los chimú, en numerosas ocasiones tal adscripción es errónea. Fueron creados, mucho antes, por la cultura sicana, cuyo principal centro radicó en Batán Grande, en el norte del Perú, y floreció entre los siglos octavo y decimocuarto.

Durante el Sicán medio, transcurrido entre el 900 y el 1100 d.C., se fabricaron ingentes cantidades de artículos de metales preciosos, muchos de los cuales destacan por su refinada factura. Recientemente, nosotros y otros expertos examinamos con la mayor atención la labor de conformación metálica a partir de un yacimiento del Sicán medio; nos proponíamos reconstruir la técnica y la organización de la producción de metales preciosos, así como acotar el significado cultural de los artículos. Hemos llegado a la conclusión de que la escala y variedad del uso del metal por los hombres del Sicán medio carecen de precedentes en el Nuevo Mundo prehispánico. La generalización de la producción de cobre arsenical por esta cultura introdujo la edad del bronce en el Perú septentrional. Las aleaciones de oro constituían el medio más prestigioso para la expresión política, económica y religiosa. En nuestra opinión, la producción metalúrgica vino a constituir el principal elemento impulsor del desarrollo cultural del Sicán medio.

Casi todos los objetos que se guardan en colecciones privadas o públicas provienen de tumbas saqueadas de la Reserva Nacional Arqueológica y Ecológica de Poma, en la región de Batán Grande. La oleada moderna de expoliaciones se inició en los años treinta. El saqueo culminó, a finales de los años sesenta, con el empleo de una excavadora que, durante un año, levantó el estrato superior de suelo para ver mejor los contornos de los hoyos de las tumbas, lo que facilitó un pillaje intenso. Cuando Shimada empezó el trabajo de campo en 1978, contó, en las fotografías aéreas de la Reserva Nacional de Poma, más de 100.000 agujeros abiertos por los saqueadores y cientos de zanjas hechas con excavadoras.

La ausencia de información contextual para las piezas robadas limita mucho las posibilidades de entender la función sociopolítica, religiosa y económica que cumplían. Añádase que, con demasiada frecuencia, se tomaron medidas discutibles y sin base documentada para "restaurarlas". Pudieron haberse borrado, en una labor de limpieza descuidada, pigmentos, plumas y marcas de útiles antiguos sobre objetos de oro. Incrustaciones y ajorcas "perdidas" se reemplazaron a capricho. Por consiguiente, la apariencia de las piezas no puede reputarse como genuina, prevención que limita la información que podemos sacar de las mismas. Cualquier esfuerzo por comprender los objetos, su sentido cultural y las técnicas usadas en su elaboración descansará sobre bases firmes si se funda en artefactos recuperados con métodos científicos de tumbas sin profanar.

La posibilidad de proceder por esa senda se nos brindó con la primera excavación científica de cierta tumba perteneciente a un miembro de la casta dirigente del Sicán medio en Huaca Loro, un sepulcro de adobe dentro del recinto de la Reserva de Poma. La tumba era una más del rosario dejado por el Sicán medio a lo largo de los emplazamientos norte y este de Huaca Loro. Shimada reconoció la tumba del noble durante un trabajo de inspección en Batán Grande. En ese año de 1978, diseñó el proyecto de excavación de la misma dentro de un programa más ambicioso de muestreo de las tumbas de Sicán, que duraría diez años y se proponía desentrañar la organización social de esta cultura. Había que constituir un grupo de especialistas y acoplar en un todo coherente la cronología cultural del Sicán, amén de realizar otras comprobaciones imprescindibles. Por fin, entre octubre de 1991 y marzo de 1992, se excavó la cámara funeraria bajo la supervisión de Shimada, en el marco del Proyecto Arqueológico del Sicán.

El ocupante central del monumento era un hombre de entre 40 y 50 años, perteneciente a la clase dominante. Le acompañaban los cuerpos de dos mujeres jóvenes y dos niños, sacrificados según todos los indicios. Los seis meses de excavaciones exhumaron cerca de 1,2 toneladas de objetos funerarios encerrados en una cámara mortuoria, distante unos tres metros del fondo de un hoyo de 11 metros de profundidad. Tres cuartas partes de la masa extraída correspondía a objetos y fragmentos metálicos. En su mayoría, los

IZUMI SHIMADA y JO ANN GRIFFIN han colaborado en la investigación de los objetos de metales preciosos del Sicán. Durante las dos últimas décadas, Shimada dirigió distintas campañas arqueológicas en la costa norte del Perú. Jo Ann Griffin ha dedicado treinta años al estudio de la metalurgia prehispánica.

objetos eran de oro de 14 a 18 quilates. Algunas piezas y casi todos los fragmentos eran de *tumbaga*: aleación de oro y cobre o de oro, plata y cobre, equivalente al oro de 10 a 14 quilates utilizado hoy en joyería.

En disposición concéntrica, los objetos rodeaban el cuerpo del hombre, pintado de arriba abajo con cinabrio (una pintura de color rojo intenso compuesta por sulfuro de mercurio y un aglutinante). Se le había colocado sentado, en posición invertida. A la cabeza, adornada con tres juegos de ornamentos uncidos a cada oreja y provista de una gran máscara de oro, se le había dado un giro de 180 grados, y luego inclinado hacia atrás para mirar hacia arriba. Cubría el resto invertido del cuerpo un manto al que se habían cosido unas 2000 laminillas cuadradas de oro.

Alrededor del noble, encima y en la base del mismo había un cetro con ornamentos de oro y *tumbaga*, había también un tocado de oro con la representación escultórica de la cabeza de un animal, un par de espinilleras de oro, un par de guantes de *tumbaga* de un metro de longitud (uno de ellos sostenía una copa de oro con la base de plata repujada), un cuchillo ceremonial de plata (o *tumi*) y un montoncito de seis pares de zarcillos de oro. Protegía su pecho una capa, de casi diez centímetros de espesor, de cuentas (hechas de sodelita, amatista, cristal de cuarzo, turquesa, fluorita, calcita, conchas y otros materiales). Más lejos, cerca de las paredes de la cámara, se desenterraron casi 500 kg de fragmentos de *tumbaga* y más de 250 kg de útiles de cobre arsenical.

El hallazgo más impresionante, con diferencia, de la tumba es el Cofre de Oro 1, que descubrimos en la esquina noroeste de la cámara. Dentro de una caja rectangular forrada con tapete tejido se encontraron, por lo menos, unos 60 objetos importantes, la mayoría de láminas de oro y el resto de plata o *tumbaga*. El cofre guardaba una peculiar mezcolanza de ornamentos rituales y personales: cinco coronas, cuatro diademas, una docena de adornos para la cabeza en forma de *tumi*, seis o más tocados ornamentales de plumas de oro, tres abanicos de *tumbaga* y catorce grandes discos que podrían haber sido utilizados como decoración de los bastones de mando o bien como adorno de la parte posterior del tocado. En el fondo del cofre descansaban los artículos mayores: cuatro juegos de tocados parabólicos que se colocarían en la parte superior de la corona y frente a la misma.

Dos de los siete nichos excavados en las paredes de la cámara también contenían objetos de metal. Un hoyo hurgado en el nicho mayor, en la pared este, aportó unos 1500 mazos de *naipes*. Estos objetos de cobre arsenical, de forma y tamaño uniformes, pudieron haber servido de moneda de cambio. Cada mazo lo integraban 12 o 13 *naipes*. El hoyo también guardaba dos cuchillos *tumi* de una aleación de plata, miles de hojitas cuadradas de *tumbaga* y, por lo menos, dos docenas de máscaras de *tumbaga* asimismo e idéntico diseño que la gran máscara de oro encontrada sobre el noble, aunque menores, de técnica inferior y con menos ornamentación. Un segundo nicho (Cofre de Oro 2) contenía otra colección de ornamentos de oro y objetos rituales. De la sepultura recuperamos también más de 50 kg de piedras diversas y cuentas de con-

COLOMBIA
ECUADOR
PERU
Reserva de Poma
BRASIL
Lima
BOLIVIA



1. FIGURA DE ORO RECORTADA de un presumible noble del Sicán, enterrado en una tumba de Huaca Loro, en la Reserva Nacional Arqueológica y Ecológica de Poma. Tras decenios de pillaje, esta sepultura fue la primera de un miembro de la clase dominante en la que se acometió una excavación científica. La figura de oro (de unos 12 cm de altura) decoraba probablemente un tocado trabajado.

chas, el armazón de una litera esculpida en madera, unos tres kilos de cinabrio y 21 vasos de cerámica.

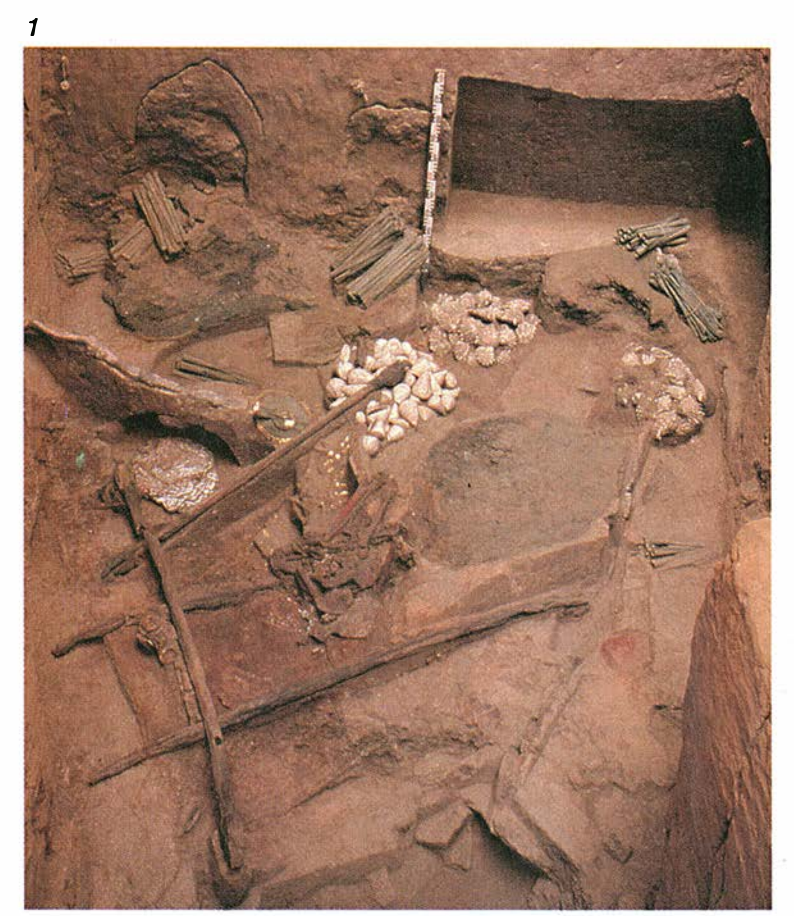
A Griffin, coautora del artículo, que ha examinado los objetos procedentes de Huaca Loro, debemos buena parte de cuanto sabemos sobre la producción de metales preciosos en Sicán. Expertos de disciplinas afines nos ayudaron a interpretar la información que nos proporcionaron otras muestras metálicas, plumas, abalorios y restos relacionados con los objetos metálicos.

La metalurgia andina pone especial énfasis en el uso de láminas metálicas, conformadas a partir de lingotes con martillos y yunques de piedra. Las coronas de oro y otros ornamentos se elaboran con láminas de oro decoradas mediante repujado y punzonado. Por lo que concierne a lisura, consistencia y cuantía, los objetos provinientes de la tumba de Huaca Loro constituyen excelentes ejemplos de una tradición conformadora del laminado. Las herramientas esenciales para sacar laminillas y alambres son, líticos, el martillo de mano y su yunque correspondiente; de cobre arsenical y *tumbaga*, los cinceles y ranuradoras. Los martillos solían ser de magnetita, hematites y basalto de grano fino; iban de los muy finos al tamaño de un puño. Con la cara redondeada del martillo se estiraba el metal, con la otra cara se alisaba y se eliminaban los hoyuelos dejados por los golpes del estiramiento. Se conseguía una lámina plana y lisa. Pese a su fácil descripción, la tarea requería tiempo y des-

Excavación de una tumba del Sicán medio

La tumba situada en Huaca Loro contiene los despojos de un hombre de entre 40 y 50 años, miembro de la clase dominante del Sicán. Estaba acompañado por dos mujeres jóvenes y dos niños. El hombre fue enterrado sentado y en posición invertida (*1*), pero con la cabeza girada 180 grados y torcida hacia atrás para que mirase hacia arriba. Cubría su rostro con una gran máscara de oro, que se muestra al poco de extraerla del sepulcro (*2*) cuando aún estaba deformada y manchada con tierra (*3*). Durante el proceso de restauración (*4*), se colocaron trozos de tela de nylon sobre la máscara para evitar la exfoliación del cinabrio utilizado originariamente en su pintura. La máscara y tocado (*5; de un metro de altura*), ya totalmente restaurados, ofrecen una asombrosa muestra del refinamiento alcanzado por un grupo de maestros forjadores y de la sociedad a la cual pertenecían. Además de los cuerpos y sus atuendos, la tumba contenía 1,2 toneladas de objetos diversos (*6*), en su mayoría de metal precioso.

1



2



3



4



treza. Porque el artesano debía forjar el oro en frío, teníase que recocer regularmente el metal para evitar las grietas de tensión.

Muchos de los objetos desenterrados en Huaca Loro dan fe de una extraordinaria pericia en la fabricación laminar. Fijémonos, a modo de ejemplo, en los largos ribetes de dos tocados parabólicos. Cada uno constituye una tira continua, de unos dos metros de longitud, de metal forjado con una anchura regular de unos 4,5 centímetros y un espesor de 0,15 milímetros: se trata de una espléndida realización de conformación laminar. No menor hazaña es la máscara (de 46 por 29 cm) que cubre la cara del noble enterrado. Se ejecutó a partir de una lámina de unos 0,6 mm de espesor. El material debía ser lo bastante fino para mantener bajo el peso de la máscara (solamente 677 gramos) pero lo bastante grueso para dejar emerger, desde el centro, una nariz prominente.

La habilidad desarrollada en la conformación laminar se patentiza, asimismo, en la docena larga de tocados *tumi*. La espiga de cada tocado debía ser delgada, aunque dotada de la tenacidad suficiente (en torno al milímetro de diámetro) para mantenerse recta cuando se insertaba en un turbante o en el hueco de la corona. En la punta la laminilla mide sólo de 0,15 a 0,18 mm de espesor. El maestro sabía cuánto debía aplanar la lámina para darle la elasticidad precisa, de suerte que en cada movimiento de la cabeza ondulara sin romperse ni doblarse.

Igual ocurría con los seis conjuntos de plumas de oro que formaban, se supone, parte de un tocado trabajado. Los conjuntos que hemos estudiado se componen de 11 o 12 plumas; cada pluma mide unos 20 o 21 cm de largo y un par de centímetros de ancho. El espesor de las plumas disminuye desde el raquis (unos 0,10 mm) hasta la punta (unos 0,07 mm). El conjunto dibuja la forma de abanico: la pluma central se mantiene recta, en tanto que las laterales aumentan su curvatura hacia la izquierda o la derecha. Las plumas se ensamblan mediante tirantes y ranuras cerca del raquis. Debajo de los tirantes, advertimos en cada pluma una leve cresta, a lo largo del eje longitudinal, para conferir cierta rigidez. En el raquis se conservan señales de filamentos muy finos que parecen servir para prender las plumas al forro de una prenda. El diseño y estructura global, así como los tocados *tumi*, facilitaban la suave oscilación de las plumas con los movimientos de cabeza.

Los seis pares de zarcillos de oro encontrados cerca de la esquina sureste de la tumba demuestran un dominio técnico singular. Evidencian una constelación de rasgos de diseño que podrían indicarnos que estamos ante una escuela de orfebres. Entre los efectos de la conformación metálica, diversos, avanzados e insólitamente coincidentes, hallamos la forja de alambre, la filigrana, un excelente acabado y pulido y la protosoldadura. Constituye la protosoldadura un método para unir aleaciones de oro o plata que emplea el cobre en esas aleaciones o el cardencillo (acetato de cobre) en una cola orgánica. Las piezas a unir se calientan sobre carbón vegetal en una atmósfera reductora; a la temperatura correcta se forma una nueva aleación en el punto de contacto entre los metales.

Para que los zarcillos no se retorcieran mientras se insertaban en la oreja, se realizaban de un patrón algo grueso (de unos 0,35 a 0,55 mm de diámetro). La cara frontal se

5



6



abombaba martilleando el reverso contra una depresión somera, de madera. El abombamiento incrementaba la solidez a medida que aumentaba la deformación requerida por el diseño.

En tres pares de zarcillos los artesanos ejecutaron complejos diseños decorativos por medio de soluciones mecánicas simples y elegantes. Una de éstas fue la unión de "pestaña y ranura" para la lámina metálica que forma el cuerpo central mediante la conexión de la cara frontal con la posterior. En varios pares, recurrieron a soportes estructurales de alambre, para crear la ilusión de que los elementos centrales de la figura flotaban dentro del armazón de la cara frontal.

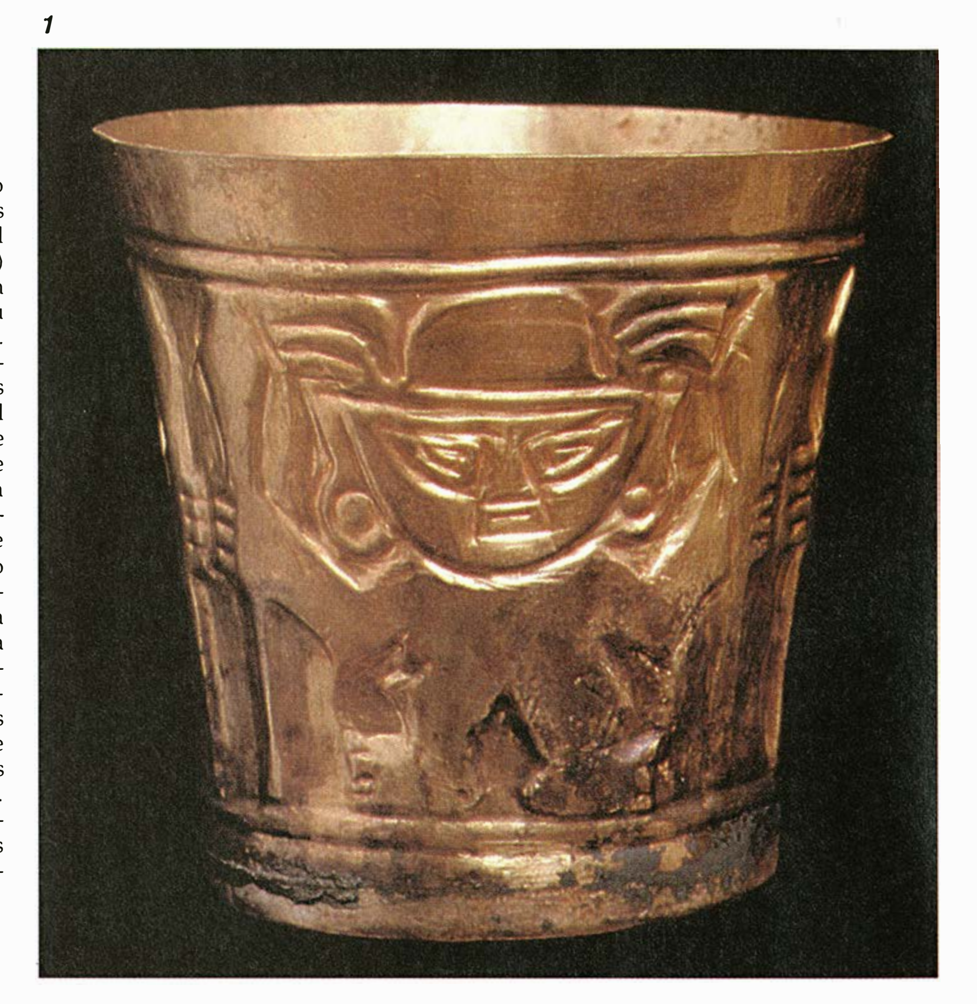
Cierto par de zarcillos, en fase de "esbozo" o a modo de prueba, nos revelan de qué modo los orfebres del Sicán perfilaban gradualmente las soluciones mecánicas planteadas por los problemas de un nuevo diseño. En el par en cuestión se utilizó hilo de oro muy puro para ensamblar un marco circular a la abrazadera en aspa, situada debajo. Otros pares, de ejecución más tardía, ilustran el uso de protosoldaduras permanentes para el mismo propósito.

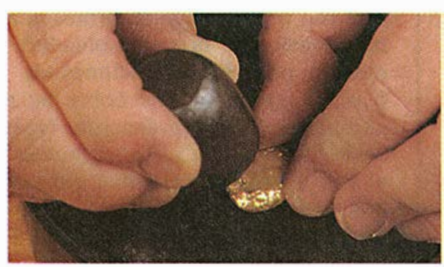
Una prueba más de la cuidadosa planificación nos la ofrece la máscara de oro; porta ésta su propio par de zarcillos fijados directamente en los lóbulos de la oreja metálica mediante tirantes y ranuras. El tamaño y forma de los lóbulos se ajustan al tamaño y forma de la cara posterior de los zarcillos; pero no sólo eso:

Técnicas de conformación metálica del Sicán

Por los defectos de un vaso de oro (*1*) llegamos a conocer mejor los métodos de los orfebres sicanos. El vaso (*de unos 12 centímetros de altura*) está decorado con la representación cincelada de un noble, mostrado en su integridad en un dibujo moderno (*2*). En el cincelado se utilizó una herramienta muy ancha y con los bordes afilados, inadecuada para ejecutar el mentón redondeado del personaje; de ahí el trazo tortuoso resultante. La base de plata del vaso muestra una textura en "piel de naranja", fruto del sobrecalentamiento. También hay restos de plata en el fondo del vaso; sugiere ello que una parte del borde se fundió accidentalmente mientras la base se unía al fondo del vaso. La pequeña máscara de oro (*4; de unos 7 cm de altura*) muestra los exquisitos detalles de un repujado-cincelado característico de los orfebres. Un examen más atento de los ojos y nariz (*3*) ilustra las muescas ovales dejadas por las herramientas. Jo Ann Griffin, coautora de este trabajo, enseña las técnicas básicas usadas por los orfebres sicanos en las fotografías 5-9.

1





5. LA PRODUCCION de objetos hechos con láminas empezaba a partir de un lingote. Con la cara abombada del martillo de piedra, el orfebre golpeaba el lingote encima del yunque, también de piedra.



6. PARA ALISAR la preforma, el orfebre utilizaba la cara plana del martillo. Este proceso eliminaba también los hoyuelos hechos por la cara redondeada.



7. EL CORTE de la lámina hasta la forma deseada se realizaba mediante un cincel de *tumbaga*.

también encajan las ranuras de los tres tirantes en cada oreja. Las ranuras se troquelaban, a la vez, a través de ambas piezas y con los mismos golpes verticales. Resulta verosímil que la máscara y todos los pendientes se tallaran en el mismo taller.

No todos los objetos encontrados en la tumba de Huaca Loro tienen un acabado tan perfecto. Consideremos, a este propósito, el vaso de doble fondo encontrado en la mano de un guante ceremonial de *tumbaga*. Mide unos 12 cm de altura por 10 cm de diámetro. La base, que es de lámina de plata, encaja con el fondo del vaso de oro, y estaba destinada a contener piedras para repiquetear. Por culpa de un sobrecalentamiento se fundió un trozo del reborde de la base de plata, lo que explica la textura en "piel de naranja" que presenta. El fondo del vaso de oro muestra una inconfundible capa semicircular gris, que se extiende hasta el lado, donde falta un trozo del borde de la base de plata. Estas señales nos revelan que se fundió accidentalmente parte del borde mientras se procedía a la unión de la base de plata con el fondo de oro. El vaso se colocó boca abajo en el horno; bastaron unos segundos para que el sobrecalentamiento fundiera la plata y desencadenara los efectos observados. El fondo de oro quedó cubierto por una salpicadura de plata fundida.

De otros detalles técnicos del vaso podemos extraer también información de interés. Así, está decorado con tres representaciones cinceladas de un señor de la nobleza. Para esculpir la imagen el artesano se servía de un cincel de tres o cuatro milímetros de ancho. Esta herramienta era demasiado ancha y afilada para obtener el mentón redondeado del rostro de la figura; de ahí el trazo irregular del dibujo de la barbilla. Terminado el cincelado, no se hizo nada por corregir el defecto.

El orfebre interrumpiría frecuentemente su trabajo para recocer la pieza y anticiparse a las grietas de tensión que pudieran presentarse. ¿Cómo sabía el momento exacto? Por el sonido. Acabado de recocer, el metal emite un sonido sordo con los golpes de martillo. Después de varios golpes, el tono se vuelve más agudo. Con el oído acostumbrado a los tonos de la percusión, el maestro sabía cuándo llegaba el momento de recocer.

La impresionante producción de láminas metálicas producidas durante el Sicán medio se aprecia con particular nitidez en los 500 kg de chatarra apilada en los extremos de la cámara funeraria. No parece que esos montones fueran los únicos: los buscadores de tesoros locales recuerdan haber encontrado cantidades similares de chatarra en otras tumbas de los alrededores. Nosotros mismos comprobamos el empleo de láminas de *tumbaga* para revestir el interior de la gigantesca tumba del Sicán medio en Huaca Las Ventanas. Este monumento sepulcral, hundido a unos 11 metros del suelo, mide 15 × 15 metros en la entrada y 3 × 3 metros en el fondo. La superficie interior se hallaba tapizada con láminas rectangulares de dimensiones fijas, colocadas una al lado de la otra. Se cubrían con ropas de algodón donde se ilustraban imágenes y escenas religiosas policromadas. La superficie total de las láminas metálicas que forraban la tumba podría superar los 100 metros cuadrados.

Llamamos aquí chatarra a los fragmentos sueltos que se desechan en los procesos de conformación metá-

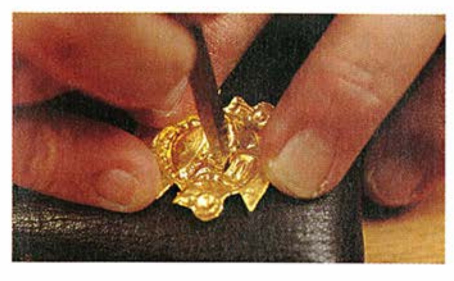
2



3



4



8. **EL REPUJADO empleaba otra herramienta de *tumbaga*; creaba formas que sobresalían de la lámina. La preforma se apoyaba contra la superficie de un saco de cuero lleno de arena.**



9. **CINCELADO posterior de los detalles en la cara anterior del objeto.**

lica de láminas o en la posterior fase de elaboración. Chatarra son un lingote de *tumbaga*, parcialmemnte utilizado, chapas cuadradas de oro con unos agujeros bastos, hilos rotos, campanas agrietadas y desbastes laminares que aún conservan el perfil de las piezas recortadas.

La chatarra nos habla de una enorme inversión en mano de obra y materiales; su presencia en la tumba da cuenta del poder del noble enterrado. Griffin tardó casi un día y medio en obtener una delgada lámina uniforme de 10 × 15 centímetros de tamaño, a partir de una pepita de 30 gramos de oro, sirviéndose de un martillo de piedra antiguo. Los orfebres del Sicán añadían, además, un proceso de lixiviación: trataban las láminas de *tumbaga* con ácido, que disolvía metales básicos de la superficie. Con ello, las láminas de *tumbaga* adquirían la apariencia del oro de 24 quilates. Pulían luego las láminas dotándolas de un excelente acabado y compactando la capa del oro dejada por la lixiviación. Para nosotros, esta capa de oro compactado corresponde al oro de recubrimiento visto a menudo en piezas de *tumbaga* doradas. Algunos han propuesto que el dorado en cuestión se debió a deposición electroquímica, pero ninguno de los análisis de las láminas que hemos realizado ofrece indicios que respalden semejante conjetura.

La cultura del Sicán debió de disponer de un nutrido cuerpo de maestros que producían piezas laminares para aplicaciones de diversa índole. El notable grado de control sobre el forjado y laminación observado en estos objetos demuestra que la tarea estaba en manos de especialistas con dedicación exclusiva. Los maestros pudieron rodearse de docenas de aprendices que se encargarían de las primeras etapas de la refundición de chatarra para convertirla en lingotes de futuras laminaciones.

Esta concatenación maestro-aprendiz se manifiesta de forma palmaria en las etapas de fabricación de otros objetos. Cierta corona, en particular, muestra un excelente trabajo de cincelado y perforaciones en la parte frontal, pero un martillado y perforación irregulares, así como tenues marcas de plantilla, en la parte posterior. Parece verosímil que un maestro empezara la parte frontal, le indicara a un aprendiz cómo seguir y acometiera luego otra tarea.

Un trabajo de tal naturaleza requería talleres de varias habitaciones, cada uno equipado con un determinado número de aprendices y rindiendo una producción considerable. La laminación, que necesitaba muchas horas de martilleo rítmico periódicamente interrumpido para recocer, debería de desarrollarse en una estancia ventilada. Por contra, el pulido exigiría otra habitación, muy protegida, ya que la arena transportada por el viento y otros contaminantes podrían arruinar sus esfuerzos. No por azar, las instalaciones de muchas habitaciones, construidas en adobe, situadas al norte de la plataforma de Huaca Loro y noroeste de Huaca Las Ventanas, tienen bancos, estancias de dos pisos y muchos hoyos dispersos donde se pueden encontrar fragmentos de escoria, gotas de aleación de cobre y muestras de que se utilizó allí el fuego. Todo apunta a que ambas zonas fueron centros de conformación metálica.

El proceso de laminación demanda singular pericia. Mayor habilidad todavía se requiere para darle forma y ornato a los objetos de oro. Debido a su excepcional calidad, diseño innovador y refinamiento técnico, la máscara y los zarcillos de la tumba de Huaca Loro debían de ser obra de uno o dos maestros. Otros objetos de oro pudieron realizarse en talleres distintos. Ahora bien, aunque los talleres estuvieran especializados en diferentes funciones, resulta imposible que trabajaran aislados: parte del proceso de aprendizaje reclamaría el contacto asiduo con los maestros.

Parte de la diversidad técnica observada puede reflejar diferencias en los estilos personales de los orfebres. Muchos objetos de oro de Huaca Loro son casi idénticos, lo mismo en la forma que en el tamaño, pero se fabricaron por métodos distintos. Así, en ciertos cascabeleros, las ajorcas se engarzaron en bandas circulares "flotantes" mediante alambres protosoldados, mientras otras fueron ensambladas con lazos de alambre. Algunos clavos de oro afilados que porta un tirador de dardos fueron cortados sobre un patrón de diente







2. ZARCILLOS que aportan algunos de los ejemplos de conformación metálica de mayor refinamiento técnico del Sicán medio. El dorso (*abajo a la izquierda*) revela algunos pormenores de su elaboración, incluida una abrazadera en X unida por protosoldadura. En perfil (*abajo a la derecha*), se aprecia otro método de unión, el de pestaña y ranura. Los zarcillos miden unos 10 centímetros de diámetro.



de sierra, a partir de un hilo forjado a mano con un cincel; otros fueron cortados del extremo de un hilo que se había trefilado en forma cónica.

Ese conjunto de observaciones nos inducen a concluir que la producción de objetos metálicos estaba organizada en grupos especializados en distintas tareas, grupos que, a su vez, mantenían una estructura jerárquica de maestros, aprendices y personal auxiliar. El hechurado de metales preciosos no debe considerarse aislado de otras artesanías. Debió de dedicarse un gran esfuerzo a la obtención y preparación de plumas, cinabrio, hematites y otros materiales que cubrían los objetos metálicos. Había que reunir minerales, conchas, alquitrán y otras sustancias para las incrustaciones; para la fabricación de colas, se necesitaban resinas y betún natural. Tenía que tejerse el paño para los forros. Sabemos que el cobre arsenical se producía con abundancia en instalaciones especializadas cercanas a las minas. Todas esas actividades han de tenerse en cuenta si queremos apreciar la magnitud y complejidad de la fabricación de artículos suntuarios durante el Sicán medio.

Si tanto trabajo empeñó la gente del Sicán en la conformación metálica, sería porque los artículos de metal gozaban de especial significación en su cultura. Los objetos de oro parecen haber constituido el punto de referencia estético del arte del Sicán medio: encarnan los cánones supremos de la expresión artística de esa cultura. Y es entre dichos objetos de oro donde hemos encontrado las expresiones más explícitas de las figuras y escenas del Sicán medio. Las decoraciones cerámicas ofrecen, por otro lado, meras versiones parciales o simplificadas de dichas representaciones.

Según todos los indicios, el estrato social al que se pertenecía venía determinado por la capacidad de acceso a los metales. Las veintitantas tumbas excavadas pueden agruparse de acuerdo con ese criterio: las que no contenían objetos metálicos, las que sólo guardaban productos de cobre arsenical, las que contenían artículos de cobre arsenical y *tumbaga*, y, por fin, enterramientos dotados con objetos de oro amén de esos otros materiales. La *tumbaga*, junto con el oro y la plata, se utilizaba, así parece, para simbolizar poder político o rango social y para transmitir mensajes religiosos. A tenor de la escala de producción y la clase de uso, la *tumbaga* gozó del mayor aprecio entre los metales, aunque iba detrás del oro en las preferencias de la élite del Sicán medio. Los ornamentos personales que rodeaban el cuerpo central hallado en Huaca Loro eran de oro. Los objetos de *tumbaga*, cuya función era probablemente auxiliar, estaban colocados en la periferia de la cámara funeraria.

En otras palabras, los objetos de oro estaban reservados para uso personal (ornamentación y ritual) de la clase dominante. La *tumbaga* dorada se utilizaba para decorar artículos asociados con dicha casta así como los objetos de la clase social que le seguía; la *tumbaga* permitía a los sicanos de segundo escalón emular a la élite dominante. Seguramente la *tumbaga* dorada, con un porcentaje bajo en oro, fue el sustituto socorrido para satisfacer la amplia demanda de láminas metálicas ricas en dorados.

Muchos de los objetos de metales preciosos hallados en la tumba se lucieron juntos en exhibiciones públicas llamadas a causar admiración entre los espectadores. El muestrario completo de insignias de autoridad y ceremoniales que acompañan al noble enterrado en Huaca Loro nos ofrece un claro ejemplo de ello.

3. FIGURAS RECORTADAS (*de unos 12 metros de altura*), que antaño adornaron la parte superior de la manga derecha del vestido de una de las dos mujeres sacrificadas.

De acuerdo con la ceremonia de que se tratase, se engalanaría con tocados distintos: en ciertas ocasiones, se impondría una corona adornada con plumas de oro u ornamentos *tumi*; en otras, un gran tocado parabólico, además de la corona. El perímetro superior y los colgantes laterales del tocado parabólico estarían adornados con plumas coloristas de aves y ajorcas que le llegaban casi a los hombros. Se cubriría el rostro con una máscara de oro. Iría transportado en una litera de madera decorada con cabezas esculpidas de animales fantásticos. Flanqueando la litera, avanzarían algunos largos abanicos de *tumbaga*, precedida por el portador del cetro o el estandarte, éste de casi dos metros de altura, que relucía con el oro y las plumas. A cada paso, las ajorcas, las plumas de oro y otros objetos metálicos delicadamente articulados se moverían, creando un deslumbrante efecto visual y sonoro.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

METALURGIA SUPERFICIAL PRECOLOMBINA. Heather Lechtman en *Investigación y Ciencia*, págs. 20-28, agosto de 1984.

METALURGIA DE ALEACIONES DE COBRE EN EL PERU ANTIGUO. Izumi Shimada y John F. Merkel en *Investigación y Ciencia*, págs. 60-67, septiembre de 1991.

A SICAN TOMB IN PERU. I. Shimada y J. Merkel en *Minerva*, volumen 4, número 1, páginas 18-25; enero/febrero de 1993.

Misión *Pioneer* a Venus

Durante catorce años, los ingenios que componían esta misión espacial escudriñaron la atmósfera, las nubes y el espacio circundante del planeta. Los resultados aclaran la singular historia evolutiva de Venus

Janet G. Luhmann, James B. Pollack y Lawrence Colin

Se dice a menudo que Venus y la Tierra son planetas "gemelos" porque tienen un tamaño y guardan una distancia al Sol similares. A lo largo de los catorce años que duró la misión *Pioneer* se descubrió, sin embargo, que la relación entre estos dos mundos ofrecía escaso parentesco. La superficie de Venus se cuece bajo una densa atmósfera de dióxido de carbono, las nubes que la cubren son de ácido sulfúrico y, al no haber campo magnético, su alta atmósfera permanece expuesta al continuo bombardeo de partículas cargadas procedentes del Sol. La oportunidad de explorar medio tan hostil terminó bruscamente en octubre de 1992, cuando el *Pioneer Venus* ardió como un meteoro en la atmósfera del planeta.

La información reunida por la misión *Pioneer* complementa las imágenes de radar que envió hace poco la sonda *Magallanes*. Esta última se centró en el estudio geológico de la superficie de Venus y de la estructura interna del planeta; la *Pioneer*, en cambio, recogió información sobre la composición y dinámica de la atmósfera del planeta y de sus alrededores interplanetarios. Estos hallazgos ilustran cómo diferencias en apariencia insignificantes en las condiciones físicas han conducido a Venus y a la Tierra por caminos evolutivos dispares. Con esos datos, los científicos podrán evaluar el modo en que la actividad humana está cambiando el medio terrestre.

JANET G. LUHMANN, JAMES B. POLLACK y LAWRENCE COLIN han estudiado diferentes aspectos de Venus revelados por la misión *Pioneer* y otras. Luhmann se halla adscrita, desde 1980, al instituto de geofísica y física planetaria de la Universidad de California en Los Angeles. Pollack pertenece al Centro de Investigación Ames de la NASA, donde Colin presta sus servicios de técnico aeroespacial.

La misión *Pioneer Venus* constaba de dos componentes: el *vehículo orbital* y la *multisonda*. Portaba ésta cuatro sondas, una grande y tres menores e idénticas, diseñadas para internarse en la atmósfera e ir transmitiendo datos sobre las condiciones locales que se encontrasen por el camino. El *vehículo orbital* iba cargado con una docena de instrumentos para examinar la composición y naturaleza física de la alta atmósfera de Venus y de la ionosfera, la capa cargada eléctricamente que se encuentra entre la atmósfera y el espacio exterior.

La *multisonda*, lanzada en agosto de 1978, llegó a Venus el 9 de diciembre de ese mismo año. Veinticuatro días antes de su arribada, el transportador de la *multisonda*, o "bus", liberaba la sonda mayor. Unos cinco días más tarde, el bus se desprendía de las otras tres, para que emprendiesen su camino a solas. Las sondas se aproximaron al planeta por latitudes altas y bajas, por la cara oscura y la iluminada. Así se pudo, con la información que transmitieron durante sus descensos, construir una imagen global de la estructura atmosférica de Venus.

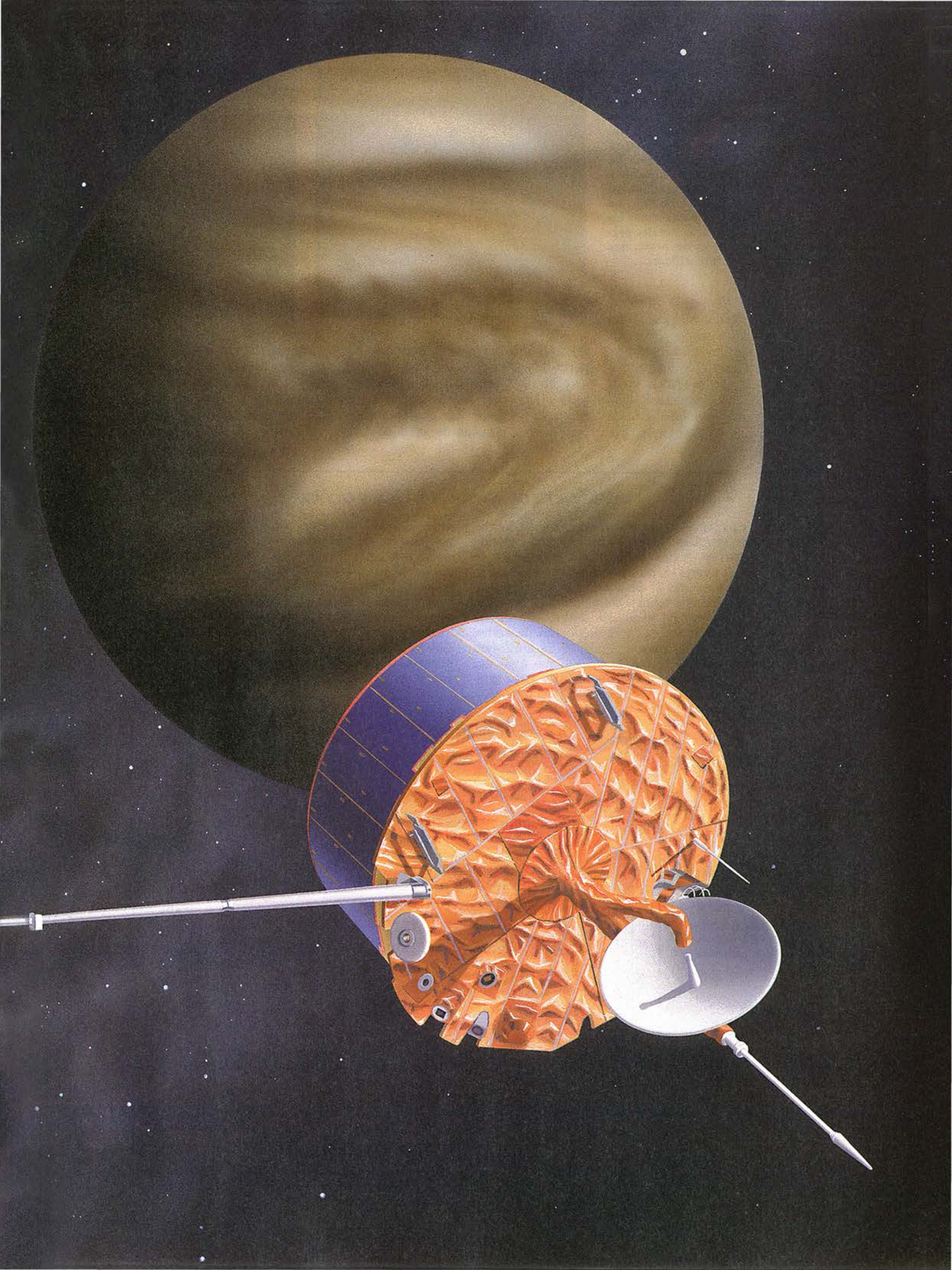
El *vehículo orbital* abandonó la Tierra en mayo de 1978, pero siguió una trayectoria algo más larga que la *multisonda*, por lo que su llegada se produjo tan sólo cinco días antes, el 4 de diciembre. En este momento tomó una órbita muy excéntrica, que descendía hasta una altura entre 150 y 200 kilómetros sobre la superficie del planeta y llegaba a alejarse hasta 66.900 kilómetros. En los momentos de mayor aproximación, los instrumentos tomaban muestras de la ionosfera y la alta atmósfera. Doce horas más tarde, el *vehículo orbital* estaba ya lo suficientemente lejos para que los equipos sensores a control remoto pudiesen tomar imágenes globales del planeta y efectuar mediciones en el medio lindante con el espacio exterior.

El arrastre gravitacional del Sol modificaba la órbita de la sonda, y fue, desde 1986, haciendo que el *vehículo orbital* pasase cada vez más cerca del planeta. Cuando sus impulsores se quedaron sin combustible, el *Pioneer* se fue hundiendo, con cada órbita, en la profundidad de la atmósfera venusina, hasta que le llegó su violento final.

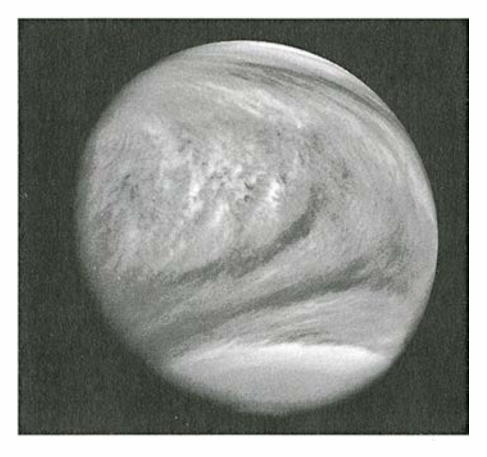
Mucho antes de la llegada de la misión, se sabía que el planeta no hacía justicia a su fama de gemelo de la Tierra. En ésta se dan las condiciones ideales para que haya agua líquida y vida. Venus es, por contra, un infierno planetario. La temperatura de su superficie alcanza los 450 grados Celsius. La presión atmosférica en la superficie multiplica 93 veces la existente al nivel del mar en la Tierra.

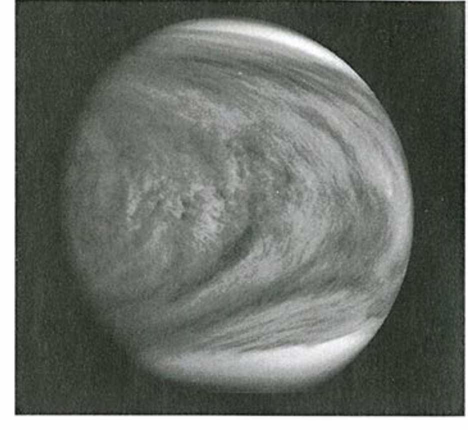
Aun dejando de lado la temperatura y la presión, el aire de Venus sería irrespirable para el hombre. La atmósfera de la Tierra está compuesta por un 78 % de nitrógeno y un 21 % de oxígeno; la de Venus, mucho más densa, es, casi en su totalidad, de CO2, seguido en abundancia por el nitrógeno, con sólo el 3,5 % de las moléculas de gas. Ambos planetas presentan parecida cantidad total de nitrógeno gaseoso, pero la atmósfera de Venus contiene 30.000 veces más dióxido de carbono que la terrestre. La Tierra contiene una cantidad de CO_2 comparable a la de la atmósfera venusina. Sin embargo, en la Tierra, el dióxido de carbono permanece confinado en rocas carbonatadas. De

1. *VEHICULO ORBITAL DE LA MISION PIONEER*, que pasó con regularidad a menos de 200 kilómetros por encima de las densas nubes de ácido sulfúrico que cubren el planeta. Durante sus 14 años de vida, la sonda dio 5055 vueltas alrededor de Venus, recogiendo abundante información sobre la atmósfera y su entorno.



2. LOS RAPIDOS VIENTOS que tienen lugar en las cimas de las nubes de Venus se mueven 60 veces más deprisa que el cuerpo del planeta. Estas imágenes ultravioletas en falso color tomadas por *Pioneer* (*derecha*) muestran la estructura nubosa y su veloz desplazamiento. La circulación atmosférica está impulsada por la radiación solar, que produce un flujo norte-sur, la célula de Hadley. La rotación de la atmósfera transforma las células de Hadley en vientos zonales predominantemente de dirección oeste, que los remolinos pueden intensificar.





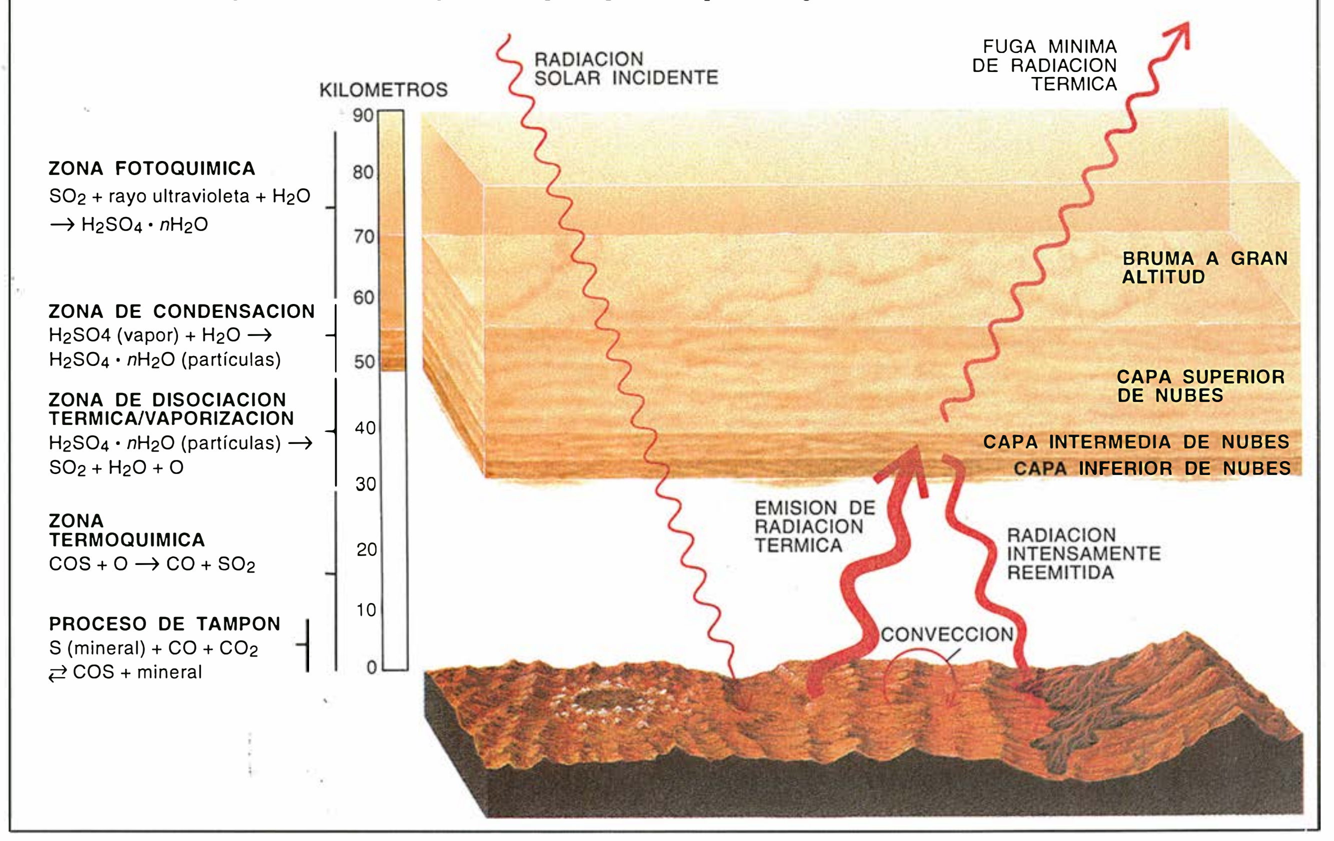
tan importante divergencia derivan muchas de las diferencias ambientales que existen entre ambos planetas.

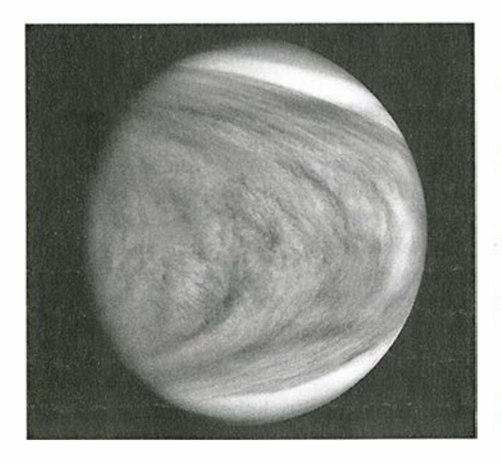
La sonda grande llevaba a bordo un espectrómetro de masas y un cromatógrafo de gases para medir la composición exacta de la atmósfera. Uno de los aspectos más asombrosos de la atmósfera venusina es su extrema sequedad. Posee sólo una cienmilésima parte del agua contenida en los océanos de la Tierra: si se condensara toda el agua de Venus en su superficie, se formaría un charco de dos centímetros escasos de profundidad.

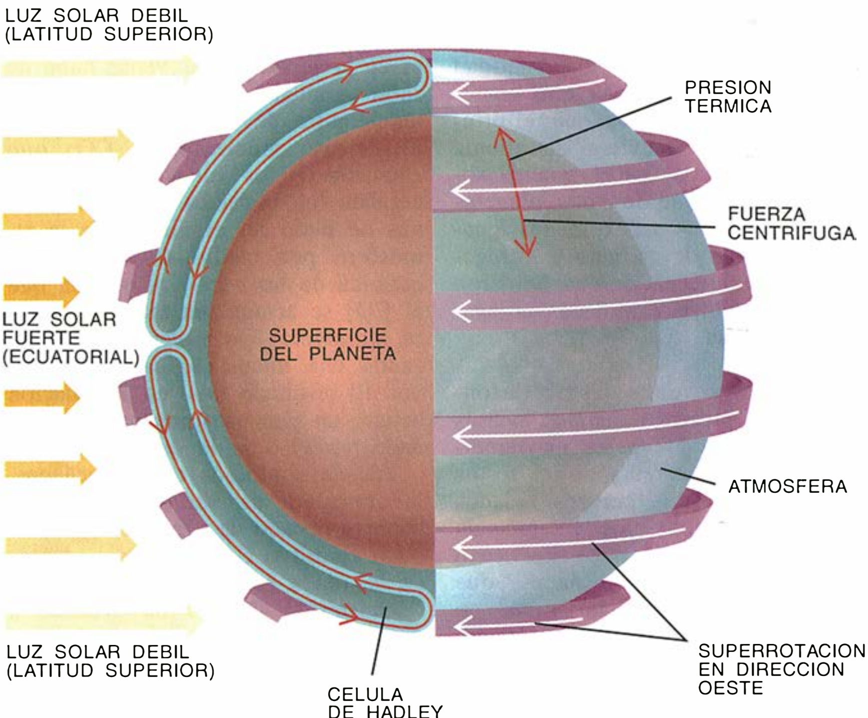
A diferencia de la Tierra, Venus alberga una cantidad mínima, si la tiene, de oxígeno molecular en su atmósfera inferior. El abundante oxígeno de la atmósfera terrestre es un producto secundario de la fotosíntesis

Atmósfera de Venus, tórrida y tóxica

Las nubes opacas y la densa atmósfera de Venus atrapan y reemiten la radiación térmica, dando lugar en la superficie a una temperatura abrasadora de 450 grados. La convección no amortigua el calor de la superficie. Las nubes son el producto de un ciclo químico en el que participa azufre elemental (S). A través de un proceso de tampón, el azufre depositado en las rocas superficiales reacciona con el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de carbono (CO_2) de la atmósfera para producir sulfuro de carbonilo (COS), que a su vez interacciona con gases ricos en oxígeno (O) para producir dióxido de azufre (SO_2). En la zona fotoquímica por encima de las nubes, el dióxido de azufre interacciona con agua (H_2O) y con rayos solares ultravioletas, dando lugar a gotas de ácido sulfúrico (H_2SO_4). Estas gotas van penetrando en la zona de condensación y crecen poco a poco a medida que avanzan, debido a que colisionan entre sí y absorben vapor de ácido sulfúrico y agua presentes en el aire. En las regiones calientes próximas a la superficie, las partículas se vaporizan, disociándose para formar dióxido de azufre y vapor de agua.







de las plantas. Si no fuera por la actividad de los seres vivos, la atmósfera de la Tierra también sería pobre en oxígeno. La atmósfera de Venus es mucho más rica que la terrestre en gases que contienen azufre, sobre todo dióxido de azufre. En la Tierra, la lluvia elimina de la atmósfera gases de azufre similares.

Otros constituyentes menores de la atmósfera venusina detectados ofrecen pistas sobre la historia interna del planeta. El gas inerte argón 40 se origina por desintegración del potasio 40 radiactivo, presente en casi todas las rocas. A medida que circula el interior de un planeta, el argón 40 atrapado dentro de las rocas profundas encuentra un resquicio de salida hacia la superficie y hacia la atmósfera, donde se va acumulando durante millones de años. La misión *Pioneer* halló menos argón 40 en la atmósfera de Venus que en la atmósfera terrestre. Esta disparidad refleja una profunda diferencia en el modo en que se transportan la masa y el calor desde el interior planetario hasta la superficie. Recientemente, la sonda *Magallanes* descubrió indicios de un pasado en Venus de vulcanismo generalizado, pero ningún rastro de las placas tectónicas gracias a las cuales la superficie de la Tierra se mantiene activa y joven geológicamente.

La misión *Pioneer Venus* detectó otros aspectos en los que Venus es más primitivo que la Tierra. La atmósfera de aquél contiene concentraciones más altas de los gases inertes o nobles —especialmente neón y otros isótopos de argón— que han acompañado a los planetas desde su nacimiento. Nos señala esta disparidad que Venus ha conservado una fracción mucho mayor de su atmósfera original. La Tierra podría haberse visto privada de buena parte de su atmósfera primigenia —perdida en el espacio— por la embestida de un cuerpo celeste del tamaño de Marte.

La densa atmósfera de Venus, dominada por CO_2, es la responsable directa de las inhóspitas condiciones reinantes en la superficie. En un cuerpo celeste que carece de aire, como la Luna, la temperatura de la superficie depende del equilibrio entre la cantidad de luz solar que absorbe la superficie y la cantidad de calor que emite hacia el espacio. La presencia de una atmósfera complica la situación, ya que impide que parte de la luz solar llegue a la superficie, y ayuda a llevar el calor en dirección ascendente. Mayor importancia reviste que los gases de la atmósfera absorban radiación infrarroja (térmica) procedente de la superficie y la reemitan de vuelta. El subsiguiente calentamiento de la superficie se denomina "efecto invernadero" porque la atmósfera funciona a modo de un gigantesco hibernáculo: la luz solar penetra en él, pero los rayos infrarojos no pueden salir, lo que causa un aumento de temperatura.

La intensidad del efecto invernadero depende de la capacidad que los gases atmosféricos tengan de captar la radiación infrarroja. Los principales gases causantes del efecto en la Tierra —dióxido de carbono y vapor de agua— absorben partes complementarias del espectro infrarrojo. En teoría, al añadir mayor cantidad de estos gases al aire debería aumentar la intensidad del efecto invernadero. La atmósfera de la Tierra es muy transparente para los rayos infrarrojos cuya longitud de onda esté entre ocho y trece micrometros (si bien el ozono, el metano, el freón y otros gases absorben rayos en franjas estrechas de esta banda). Esta "ventana" abierta del invernadero atmosférico limita el calentamiento que experimenta la Tierra.

La misión *Pioneer* mostró que, en Venus, el efecto invernadero resulta mucho más eficaz. Con los datos recogidos por las cuatro sondas atmosféricas se construyó un modelo matemático que genera unos valores que andan muy cerca de las temperaturas observadas a varias alturas. A partir de este modelo se dedujo que el CO_2 es allí el más importante de los gases de invernadero, aunque su acción se ve reforzada por la presencia de vapor de agua, nubes, dióxido de azufre y monóxido de carbono. La mezcla de gases y partículas que se produce en la atmósfera venusina obstruye la radiación térmica en casi todas las longitudes de onda; impide que el calor se escape hacia el espacio, lo que produce temperaturas de superficie elevadas.

Los astrónomos se han venido preguntando desde hace tiempo por qué es Venus tan caliente y seco en comparación con la Tierra, si, además, parece verosímil que ambos iniciaran sus días con una composición general parecida. Según la teoría actual, la formación de los dos planetas se produjo por colisión con cuerpos más pequeños y su subsiguiente absorción. En este proceso, cada protoplaneta dispersaría otros cuerpos menores, cuyas órbitas se cruzarían en

el camino del otro protoplaneta. De este modo, la Tierra y Venus deberían haber incorporado una cantidad parecida de cuerpos con alto contenido en agua incluso aunque, al principio, el agua estuviera distribuida de forma irregular en el sistema solar primitivo. Que los dos planetas tengan cantidades más o menos iguales de dióxido de carbono y nitrógeno refuerza la idea de que hubieron de tener también cantidades comparables de agua.

La Tierra y Venus desarrollaron, en sus primeros tiempos, densas atmósferas con los gases que emergían de sus interiores y de los restos vaporizados de los cuerpos helados que chocaban con ellos. El agua de la atmósfera terrestre se condensó para formar lagos y océanos, que tendrían una importancia crucial en el desarrollo climático del planeta. Pronto quedó secuestrado gran parte del CO_2 del aire en carbonatos sólidos, proceso éste que se produjo por erosión química de las rocas en presencia del agua líquida.

Es posible que Venus también tuviera vastos océanos durante su juventud. El Sol recién nacido tenía un 30 por ciento menos de luminosidad que hoy; las temperaturas reinantes en Venus estarían bastante por debajo del punto de ebullición del agua. (Venus describe su órbita a 0,72 veces la distancia de la Tierra al Sol.) Sin embargo, a medida que aumentó la luminosidad del Sol, la temperatura de la superficie de Venus hubo de subir gradualmente hasta superar la temperatura de ebullición del agua. Desde ese momento, el CO_2 que emanaba de los volcanes o que generaban los impactos que sufría Venus no pudo ser eliminado de la atmósfera por medio de la erosión química de las rocas. A medida que el CO_2 se acumulaba en la atmósfera, el efecto invernadero fue alcanzando una intensidad cada vez mayor. El resultado final es la situación actual: un planeta sofocante y dominado por el dióxido de carbono.

Tras la ebullición de los océanos, la atmósfera de Venus tendría que haberse llenado de vapor de agua, en claro contraste con los datos. ¿Adónde ha ido a parar toda esa agua?

La misión *Pioneer* ha ayudado a resolver este enigma. Ha dejado sentado que Venus sigue perdiendo agua. Las moléculas de agua, que vagan por encima de las nubes, reaccionan con la radiación solar y con otras moléculas; durante ese proceso, se dividen en sus componentes, en oxígeno e hidrógeno. Los átomos de hidrógeno pueden fugarse al espacio al interaccionar en la alta atmósfera con átomos e iones energéticos o con el viento solar, un flujo de partículas cargadas que proviene del Sol. En la superficie, los átomos de oxígeno sobrantes se combinan con minerales, e incluso pueden escapar del planeta al interaccionar con el viento solar.

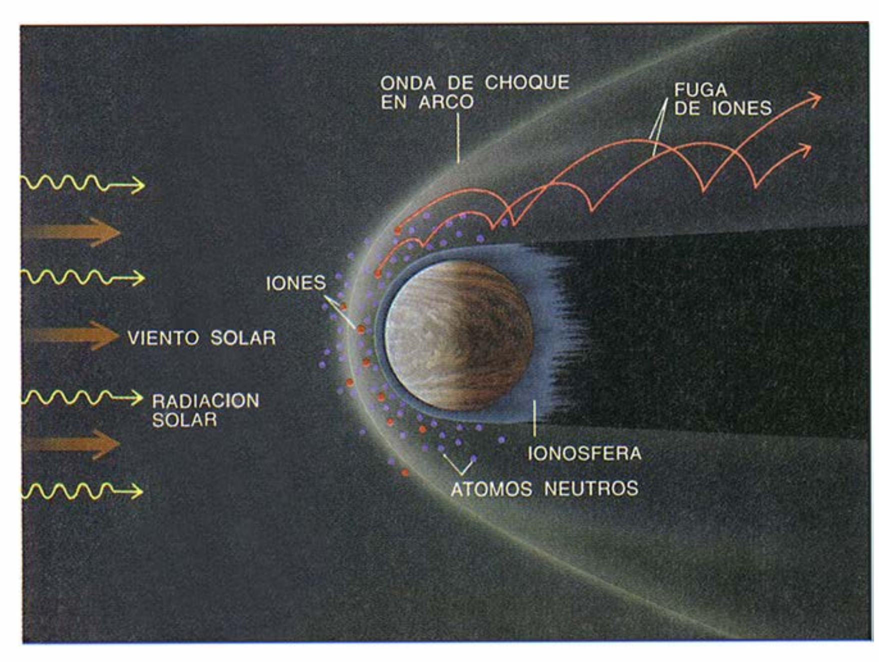
Hace miles de millones de años, la alta atmósfera de Venus contenía mucha más agua que la que presenta hoy. El Sol, en su etapa temprana, también emitía mayor cantidad de rayos ultravioletas de gran energía. Ambos factores aceleraron el ritmo de pérdida de agua por el planeta, llevada al espacio. Los cálculos indican que a lo largo de la historia del sistema solar, 4500 millones de años, Venus pudo haber perdido tanta agua como la que contienen los océanos terrestres.

Gracias a la moderada temperatura de la superficie, la Tierra nunca ha experimentado semejante merma hídrica. En nuestro planeta, permanece en la superficie o en la baja atmósfera, y sólo una pequeña cantidad llega a la alta atmósfera, donde desaparece para siempre. En Venus, una vez empezaron los océanos a bullir, la temperatura de la atmósfera del planeta fue aumentando cada vez más, con lo que subió más y más vapor de agua hacia los límites superiores de su atmósfera.

Sin embargo, todavía le queda algún resto de agua. Las observaciones de la alta atmósfera realizadas por el *vehículo orbital* señalan que el planeta pierde 5×10^{25} átomos e iones de hidrógeno por segundo. A ese ritmo, la totalidad del agua presente en la atmósfera se desvanecería en unos 200 millones de años. La edad de Venus multiplica por más de 20 veces esa cifra; por tanto, debe existir algún mecanismo capaz de reponer el agua que constantemente pierde, y consiste, casi con seguridad, en una mezcla de fuentes externas (impacto de los cometas y asteroides helados) e internas (erupciones volcánicas o de fumarolas, más comunes y continuas, en la superficie).

Pese a su escasez de agua, Venus está cubierto de densas nubes que ocultan su superficie a los telescopios tradicionales. Durante siglos, los astrónomos se han sentido intrigados por la naturaleza de las nubes. Cuando se puso en marcha la misión *Pioneer*, había ya todo un cúmulo de indicios de que las nubes se componían, en buena medida, de soluciones concentradas de ácido sulfúrico y agua. No se había podido, sin embargo, determinar la fuente del azufre de donde procedían las gotas de las nubes.

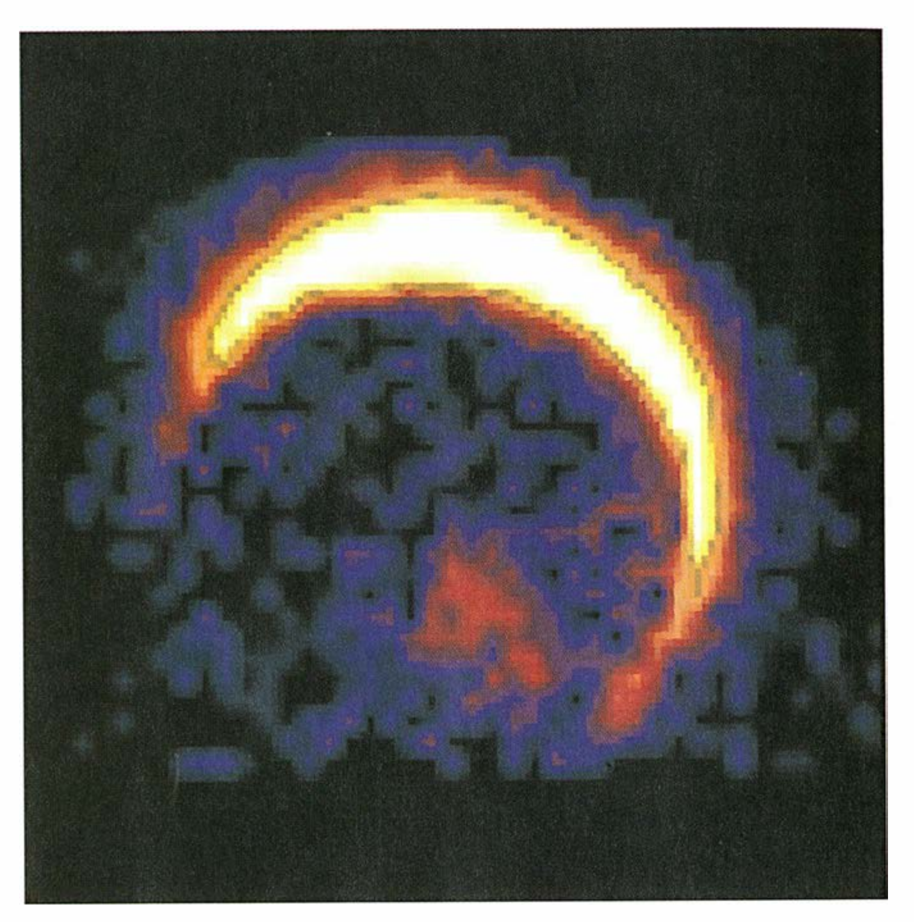
La misión *Pioneer* aclaró la cuestión. Cuando el *vehículo orbital* rodeó el planeta, examinó atentamente



3. INTERACCION DIRECTA ENTRE VIENTO SOLAR y alta atmósfera de Venus; ello se debe a que el planeta carece de un campo magnético apreciable. Allí donde el viento solar se desvía para circundar el planeta, se forma una onda de choque en arco. Algunos átomos neutros (*violeta*) de la zona superior de la atmósfera venusina se convierten en iones, eléctricamente cargados (*naranja*), que son arrastrados por el viento solar. La radiación solar origina también una capa permanentemente cargada, la ionosfera (*zona azul*).

las cimas de las nubes con su espectrómetro ultravioleta, que identifica el patrón característico de emisión y de absorción de átomos y moléculas. Asimismo, el cromatógrafo de gas de la sonda mayor midió la composición de la región que se encuentra bajo la capa principal de nubes. Los resultados demuestran que el ácido sulfúrico de las nubes proviene del dióxido sulfúrico presente en la atmósfera.

Cerca de la cima de las nubes, a unos 60 o 70 kilómetros de la superficie, los rayos ultravioletas procedentes del Sol dividen el dióxido sulfúrico en fragmentos moleculares, los radicales; éstos experimentan reacciones químicas con los radicales derivados del agua, lo que termina por producir minúsculas gotas de ácido sulfúrico. La gravedad y las corrientes de aire hacen que las gotas emigren hacia abajo. A medida que las gotas descienden, van aumentando de tamaño al chocar entre sí e ir acumulando vapor de ácido sulfúrico del aire. En la base de las nubes, e incluso por debajo, las partículas de ácido sulfúrico se disocian en dióxido sulfúrico y vapor de agua.



4. AURORA DE LA CARA NOCTURNA, resaltada en una imagen ultravioleta en falso color tomada por la sonda espacial *Pioneer*. La media luna brillante corresponde al lado iluminado del planeta, que refleja los rayos ultravioletas solares. Las auroras a parches que se observan en la cara oscura de Venus se producen por el choque de partículas de gran energía contra la atmósfera venusina.

Se detectaron partículas finísimas (de menos de una milésima de milímetro de diámetro) a altitudes entre 48 y 30 kilómetros, justo por debajo de la base de la capa de nubes. Los movimientos atmosféricos arrastran las partículas, junto con el vapor de ácido sulfúrico, hacia altitudes mayores y más frías. Allí, el ácido sulfúrico se condensa en torno a esas partículas, que así adquieren mayor tamaño y se concentran hacia la base de las nubes. La densidad de esas partículas varía según los lugares en la región inferior de la nube, por culpa quizá de las irregularidades de los movimientos ascendentes y descendentes que atraviesan la atmósfera.

Cierta observación, relacionada con la anterior, ha producido una gran conmoción y dado lugar a la controversia. Mientras exploraba la química del azufre de Venus, el *vehículo orbital* detectó una disminución, clara y continua, de la concentración de dióxido sulfúrico cerca de las cimas de las nubes. Para algunos, eso probaba que una erupción volcánica gigante había arrojado azufre a la atmósfera coincidiendo con la llegada de la nave (lo que sugería un vulcanismo activo en el planeta). Una vez concluida la erupción, los niveles de azufre tenían que descender, que fue lo que se observó. Según otros, los cambios en la composición podrían ser consecuencia de variaciones normales en la circulación de la atmósfera.

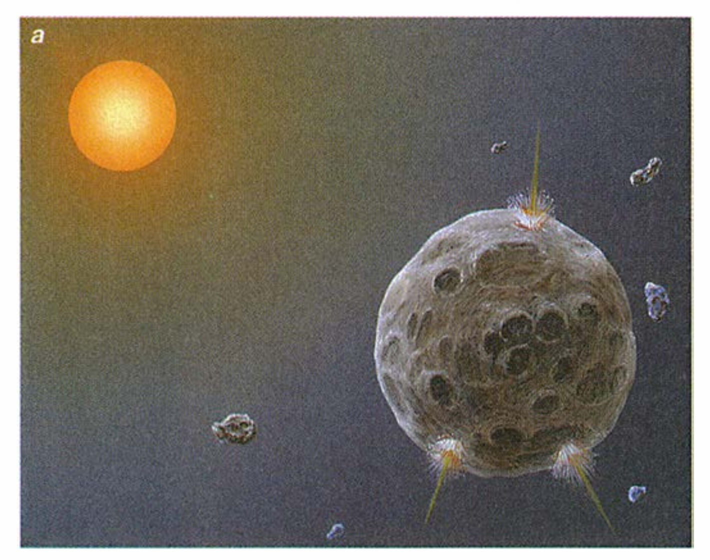
Aunque no pudo resolver el problema del dióxido sulfúrico, la misión *Pioneer* ha proporcionado muchos detalles interesantes acerca de la circulación de la atmósfera venusina, información que constituye un regalo para cuantos se aprestan a desentrañar la dinámica atmosférica, ya que muestra de qué manera actúan los patrones climáticos sobre un planeta diferente de la Tierra en aspectos decisivos.

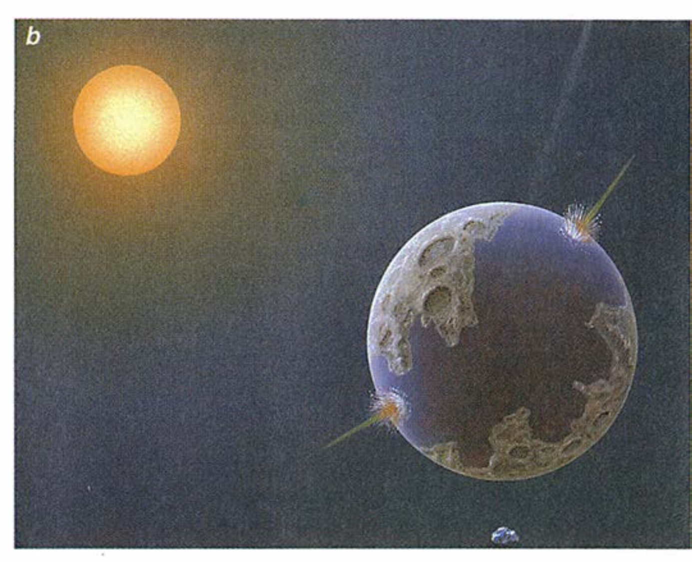
La rotación de Venus es lentísima; la Tierra completa 243 rotaciones diarias en el tiempo que tarda Venus en girar una vez con respecto a las estrellas. Además, debido a la densidad de su atmósfera, la temperatura de la superficie de Venus es casi constante desde el ecuador hasta los polos. Por tanto, se podría pensar ingenuamente que los vientos de Venus llevan muy poca velocidad.

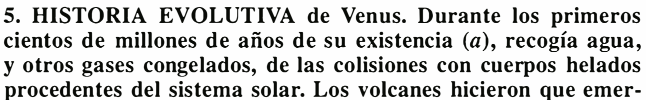
La misión *Pioneer* demostró que esa suposición es falsa. En la Tierra, los vientos que se producen a latitudes bajas se mueven más despacio que la rotación del planeta, mientras que los de latitudes más altas superan la velocidad de la superficie, estado conocido como *superrotación*. La atmósfera de Venus experimenta esta *superrotación* en todas sus latitudes y a cualquier altura, desde la vecindad de la superficie hasta 90 kilómetros por encima de la misma. Los vientos alcanzan su velocidad máxima cerca de las cimas de las nubes, donde soplan a 100 metros por segundo, unas 60 veces la rotación de la superficie.

Los vientos de la Tierra son impulsados por los desequilibrios locales entre la cantidad de energía solar recibida y la cantidad de calor radiado. En general, las bajas latitudes, que reciben mayor cantidad de luz solar, experimentan un calentamiento neto, mientras que las latitudes más altas, que reciben menos energía solar, experimentan un enfriamiento neto. En consecuencia, la atmósfera desarrolla una estructura de circulación a gran escala denominada célula de Hadley: cerca del ecuador, el aire caliente sube y viaja en dirección a los polos, donde desciende y regresa al ecuador.

Sin embargo, la rotación de un planeta sobre su eje desvía lateral-






5. HISTORIA EVOLUTIVA de Venus. Durante los primeros cientos de millones de años de su existencia (*a*), recogía agua, y otros gases congelados, de las colisiones con cuerpos helados procedentes del sistema solar. Los volcanes hicieron que emergiesen agua y otros gases del interior del planeta. En su etapa inicial, el Sol, todavía débil, permitió la existencia de océanos calientes en Venus (*b*). A medida que aumentó la intensidad del brillo solar, los océanos se fueron evaporando, llenando la

mente los vientos norte-sur (meridionales) para generar vientos este-oeste (zonales). Los vientos zonales casi siempre acaban siendo mucho más fuertes que los vientos norte-sur a partir de los que se originan. En la Tierra, la circulación de Hadley domina los movimientos atmosféricos a bajas latitudes. Los vientos zonales cercanos al ecuador se mueven a menor velocidad que la velocidad de rotación de la Tierra y son vientos del este; los que están más cerca de los polos proceden del oeste y son superrotantes, que culminan en la corriente en chorro. Lo que resulta tan extraño en los vientos zonales de Venus es que la superrotación se produce a todas las latitudes de la baja atmósfera.

Ni siquiera comprendemos todavía la razón por la que toda la baja atmósfera de Venus presenta superrotación. Es probable que la gran cantidad de energía solar absorbida en las capas altas de la atmósfera, cerca de las partes superiores de las nubes, contribuya a formar estos vientos veloces. Y cabe que el calentamiento de la atmósfera a gran altura instaure un sistema de circulación al que afecte mucho menos la interacción de rozamiento con la superficie que en el caso de la Tierra. La atmósfera de Venus podría ser, por tanto, muy propensa a la formación de remolinos que transportasen bien el momento angular. Los remolinos neutralizarían la capacidad que tiene la circulación de Hadley de impedir la superrotación a bajas latitudes. En las imágenes de las nubes hay indicios de que los vientos padecen variaciones a pequeña escala que se asemejan a remolinos.

Mucho más allá de las capas superrotantes de la atmósfera venusina se encuentra la ionosfera, una zona extensa de átomos y moléculas dotados de carga eléctrica. Los iones se generan cuando los rayos ultravioletas de alta energía, procedentes del Sol, arrancan electrones de los gases atmosféricos. La misión *Pioneer* siguió el paso de las ondas de radio a través de la ionosfera y, en los momentos de mayor aproximación al planeta, midió directamente su temperatura, densidad y composición. Tal como cabría esperar, la ionosfera de Venus es más densa en el centro del hemisferio diurno, cerca del ecuador, donde la luz solar incide directamente. Debido a las abundantes reacciones químicas que tienen lugar entre las partículas, esa ionosfera consta sobre todo de iones de oxígeno, aunque el dióxido de carbono no deja de ser el gas dominante a niveles inferiores.

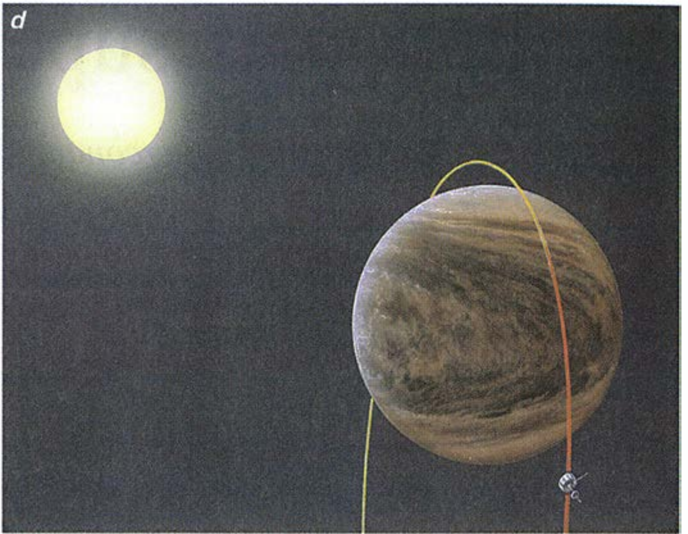
A diferencia de la Tierra, Venus carece de un campo magnético global apreciable. Esa ausencia afecta bastante a la estructura de su ionosfera. El *vehículo orbital* detectó una débil ionosfera que se extiende más allá de la frontera entre la cara oscura y la iluminada. Este descubrimiento es desconcertante: en la oscuridad, los iones y electrones libres deberían recombinarse muy deprisa y formar átomos neutros. Uno de los instrumentos de a bordo descubrió que, en Venus, los iones de la cara iluminada emigraban a la cara nocturna. En la Tierra, el campo magnético planetario de la ionosfera inhibe tales flujos horizontales.

Las imágenes en radiación ultravioleta del planeta, obtenidas gracias al espectrómetro ultravioleta, dan fe de una aurora discontinua en el hemisferio oscuro de Venus, desconocida hasta ese momento. Se atribuye la aurora a partículas de gran energía, posiblemente electrones, que se mueven a mucha velocidad y que colisionan en la atmósfera de la cara oscura. Cuando estas partículas chocan contra las moléculas de gas de la atmósfera, las excitan e ionizan, lo que intensifica la ionosfera nocturna. Las moléculas excitadas vuelven a su estado normal, de baja energía, por medio de la emisión de radiación, cuya manifestación es la aurora.

Lo mismo que acontece en las auroras terrestres, las partículas que generan las venusinas obtienen su energía de los vientos solares. El viento solar es la atmósfera externa, rarificada y extensa del astro, hecha de plasma —partículas cargadas, sobre todo protones y electrones— que sale despedida del Sol a velocidades supersónicas. En la órbita de Venus, el viento solar tiene una densidad de 15 protones y electrones por centímetro cúbico y una velocidad de 400 kilómetros por segundo. Mientras ese viento sopla por los planetas lleva parte del campo magnético del Sol consigo.

Los campos magnéticos intrínsecos que rodean a la Tierra son obstáculos para el viento solar cargado eléctricamente. El viento fluye alrededor de esos campos por una superficie (la magnetopausa) donde la presión del viento es igual a la presión magnética opuesta. El grado de desviación depende de la fuerza del campo





atmósfera de vapor de agua y dando lugar a un gran calentamiento por efecto invernadero. El agua depositada en la alta atmósfera se disoció en oxígeno e hidrógeno, que escaparon hacia el espacio (*c*). Ante la ausencia de océanos, el CO_2 emanado de los volcanes se fue acumulando en la atmósfera, intensificando el efecto invernadero. El azufre generado en la superficie formó ácido sulfúrico en las nubes. Así adquirió Venus sus características actuales (*d*).

magnético planetario. Venus, carente casi de campo magnético, crea un obstáculo apenas mayor que el propio planeta.

No obstante, el explorador espacial detectó que el plasma del viento solar se estaba desviando alrededor de Venus. Se confirmaron así las predicciones teóricas según las cuales es posible que la ionosfera de un planeta impida el paso del viento solar, aun cuando no haya un campo magnético potente. A la manera del campo magnético, la ionosfera ejerce presión contra el viento, pero en su caso es la presión térmica del gas cargado la que neutraliza la potencia del viento solar. En promedio, el punto de equilibrio se encuentra a una altitud de 300 kilómetros cerca del ecuador de mediodía de Venus, y entre 800 y 1000 kilómetros por encima del límite entre el día y la noche.

La desviación del flujo del viento solar alrededor de obstáculos de cierto tamaño (planetas, por ejemplo) viene precedida por una onda de choque "en arco", frontera limpia muy parecida a la que se forma delante de un avión supersónico. A lo largo de gran parte de su existencia, la nave atravesó la onda de choque en arco dos veces en cada ciclo orbital, lo que le permitió realizar un seguimiento de los continuos cambios que tienen lugar en el ambiente magnético que rodea a Venus. Descubrió que la onda de choque se expande y se contrae coincidiendo con el ciclo de actividad solar de once años. El tamaño del radio del choque en el plano del límite entre el día y la noche varía entre unos 14.500 kilómetros en el máximo solar y 12.500 kilómetros en el mínimo solar. La expansión y contracción son una probable consecuencia de los cambios que tienen lugar en la alta atmósfera de Venus, asociados con el flujo de radiación variable procedente del Sol.

Conforme desciende en la onda de choque en arco, el viento solar se hace cada vez más denso, se frena y cambia la dirección de su flujo. Las líneas de campo magnético interplanetario se congelan en el viento solar porque éste se halla ionizado. Una vez el viento solar ha atravesado la onda de choque, el campo magnético interplanetario congelado se amontona.

La sonda espacial levantó un mapa de la geometría a gran escala del campo magnético que rodea a Venus. Estos datos sugieren que las líneas de campo magnético terminan por deslizarse alrededor del obstáculo y dentro de la estela que éste abre en el viento solar y que recibe el nombre de cola magnética inducida; la razón de esta denominación es que deriva del campo magnético interplanetario y no del campo del propio planeta, como ocurre con la cola magnética, mucho mayor, de la Tierra.

Debido a que carece de un campo interno importante, Venus interacciona más directamente con el viento solar que la Tierra. Desde la formación del sistema solar, esa interacción ha afectado a la atmósfera de Venus. La alta atmósfera del planeta, donde predomina el oxígeno atómico, se extiende muy por encima del punto donde el viento solar se desvía rodeando al planeta. Este gas no se ve afectado por el plasma del viento solar siempre y cuando se mantenga eléctricamente neutro. Es posible que un átomo de oxígeno se ionice, si le da un rayo ultravioleta o si choca con una partícula del viento solar. El ion de oxígeno se acopla al flujo de plasma, que podría arrastrarlo fuera del planeta y más allá del sistema solar.

El viento solar limpia la alta atmósfera de Venus. Las medidas de la densidad de la ionosfera venusina indican que las capas superiores —las que superan la altura que se le calcula al obstáculo del viento solar— parecen haber desaparecido. Está claro que los iones creados por encima del obstáculo han sido retirados del modo descrito anteriormente. La sonda espacial también detectó los iones de oxígeno que se escapan en la cola del viento solar. En esencia, *Pioneer* tomó una instantánea de uno de los procesos por medio de los cuales Venus evolucionó hasta convertirse en un mundo diferente de la Tierra.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

Número monográfico sobre los resultados de la misión *Pioneer Venus*. *Journal of Geophysical Research*, vol. 5, n.º A13, 30 de diciembre, 1980.

VENUS. Dirigido por D. M. Hunten et al., University of Arizona Press, 1983.

THEORY OF PLANETARY ATMOSPHERES: AN INTRODUCTION TO THEIR PHYSICS AND CHEMISTRY. Joseph W. Chamberlain y Donald M. Hunten. Academic Press, 1987.

VENUS AERONOMY. Dirigido por C. T. Russell. Número especial de *Space Science Reviews*, vol. 55, n.os 1-4, enero/febrero 1991.

Películas superconductoras

El depósito de películas superconductoras, capa atómica a capa atómica, produce materiales cuyas temperaturas críticas son muy superiores a las que se habían venido obteniendo desde 1987

Michel Laguës

Las diversas formas de la materia a bajas temperaturas se corresponden con diferentes órdenes microscópicos. Nos son familiares los estados gaseoso, líquido y sólido. Cuando la temperatura desciende por debajo de un valor "crítico", aparece el estado superconductor —descubierto en 1911 por Gerd Holst y Kammerling Onnes— y deja de haber de repente resistencia eléctrica

Durante 50 años, el fenómeno sólo se dio hasta unas pocas decenas de grados por encima del cero absoluto. Pero desde 1986, el descubrimiento de una nueva familia de superconductores de "alta temperatura", los cupratos, ha hecho albergar esperanzas de aplicaciones variadas: transporte de alta potencia, almacenamiento de energía, producción de intensos campos magnéticos, magnetometría, telecomunicaciones, informática rápida y otros. Para las aplicaciones a gran escala se precisa la obtención de cables superconductores; a menor escala, hacen falta películas delgadas de buena calidad.

Pueden reducirse a dos los métodos de fabricación de películas delgadas: o se proyectan a la vez, sobre un soporte o sustrato, todos los elementos químicos que constituyen el material final, o se va depositando cada elemento químico que participa en la estructura de manera secuencial, a fin de engendrar, capa atómica a capa atómica, un cristal regular. Con este último método, más lento y costoso, se elaboran materiales imposibles de obtener mediante el depósito continuo de elementos.

Los resultados que se han conseguido hace poco en nuestro laboratorio de la Escuela Superior de Física y Química Industrial de París, y en otros, muestran que la deposición por capas atómicas sucesivas permite sintetizar un nuevo tipo de cupratos, las fases infinitas, donde planos de átomos de estroncio se alternan con planos de óxido de cobre. Estos nuevos óxidos podrían destronar al óxido mixto de cobre, calcio, bario y mercurio (HgBaCaCuO), que tiene desde mayo de 1993 el récord de temperatura crítica (133 grados kelvin).

La temperatura crítica de un material depende de su naturaleza y su estructura. El primer superconductor descubierto por Holst y Onnes, el mercurio, sólo lo era a temperaturas inferiores a 4,2 kelvin (o sea –269 grados Celsius). A principios de 1986, el récord de temperatura crítica estaba en 23 kelvin, y lo tenía el niobiuro de germanio, Nb_3Ge: la media de progresión había sido de sólo 0,3 grados por año, y los superconductores a temperatura ambiente parecían inaccesibles.

Los físicos teóricos que habían dado buenas razones de por qué no se sobrepasarían temperaturas críticas del orden de 30 kelvin se vieron sorprendidos cuando Georg Bednorz y Alex Müller, del Centro de Investigación de IBM en Zurich, observaron en 1986 una temperatura crítica de 30 kelvin en el óxido de cobre, bario y lantano, BaLaCuO, sintetizado en Caen en 1985 por Bernard Raveau y Claude Michel. Más tarde, Steven Chu, de la Universidad de Houston, alcanzó los 92 kelvin con el óxido de cobre, bario e itrio, YBaCuO. Por último, en 1988 el óxido de cobre, calcio, bario y talio, TlBaCaCuO, dio una temperatura crítica de 125 kelvin.

Los compuestos que han originado esta conmoción son todos cupratos de la familia de las perovskitas de cobre, es decir, cristales constituidos por el apilamiento, en todas las direcciones del espacio, de octaedros que contienen en su centro un átomo metálico, el cobre, con átomos de oxígeno en los vértices; los espacios entre los octaedros están ocupados por otro átomo metálico.

¿Rozamos un sueño? ¿Viviremos pronto en un mundo donde la corriente eléctrica circulará sin pérdidas en los ordenadores portátiles, en las cadenas de alta fidelidad, en los sistemas de vídeo? Es poco probable que suceda esto si hay que refrigerar los superconductores para beneficiarse de sus extraordinarias propiedades. ¿Se podrán sintetizar materiales que las presenten a temperatura ambiente? Vitaly Ginzburg sostiene que no ve ningún tope fundamental de la temperatura crítica hasta los 5000 kelvin, pero confiesa que no cree en temperaturas críticas superiores a los 500 kelvin.

Sin embargo, el equipo de Tomoji Kawai, de la Universidad de Osaka, observó controvertidos signos de superconducción a alta temperatura en junio de 1992, y nosotros mismos hemos obtenido indicios muy interesantes de temperaturas críticas aún superiores. Entretanto, los cupratos superconductores ya se utilizan para la producción de campos magnéticos intensos, la magnetometría médica y las telecomunicaciones.

En estas dos últimas aplicaciones, los superconductores se depositan en capas de espesor inferior, por lo general, a un micrometro (o millonésima de metro). En la hipótesis de que los cupratos se convirtieran en la base de una nueva técnica electrónica, se utilizarían en capas muy delgadas, como los semiconductores de los circuitos electrónicos actuales. El estudio de estas películas es una prioridad para el desarrollo futuro de tales sistemas.

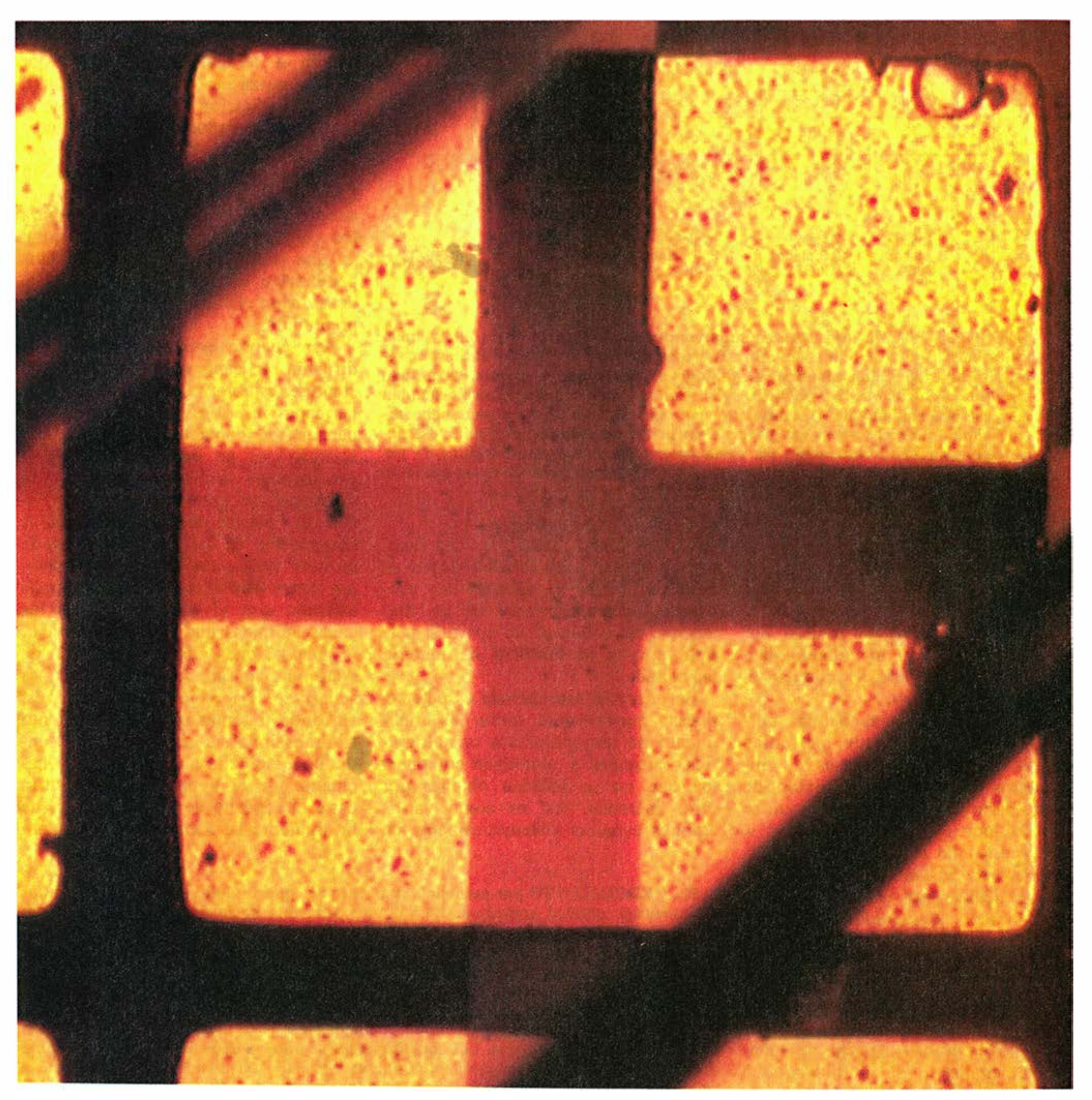
¿Por qué es mejor utilizar los superconductores en forma de película que en masa? Aparte del ahorro que ello supone en un material caro, la

Michel LAGUËS, profesor de investigación en el Centro Nacional de Investigaciones Científicas francés, dirige el equipo de superficies y superconductores de la Escuela Superior de Física y Química Industrial de París.

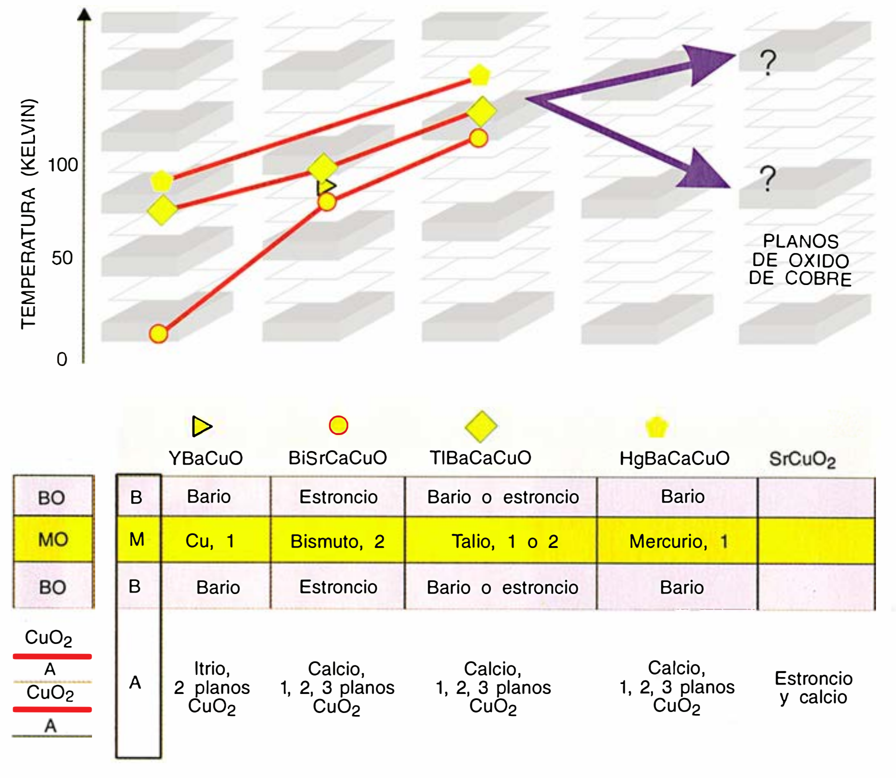
naturaleza de los circuitos electrónicos da la respuesta: en los cristales de silicio de que están hechas las pastillas ("chips"), sólo un pequeño espesor es electrónicamente activo; el resto del cristal sirve de soporte para los circuitos. El silicio es barato y un excelente disipador del calor que desprende (debido al efecto Joule) el paso de la corriente eléctrica; por eso, los electrónicos no han sentido la necesidad de buscar otro tipo de soporte.

No obstante, la capa electrónicamente activa de algunos componentes punteros está hecha de otro material semiconductor, de arseniuro de galio, GaAs, y el sustrato de silicio no desempeña ningún papel electrónico. La capa de arseniuro de galio se deposita sobre el sustrato mediante una técnica que le confiere cualidades cristalinas y eléctricas excelentes, a menudo muy superiores a las que se obtendrían con cristales gruesos: una capa de 50 nanómetros de espesor contiene entre 200 y 300 planos atómicos, a los que cabe cristalizar uno a uno por "epitaxia", utilizando el orden cristalino del sustrato como semilla para la cristalización de la película que se deposita encima. Las películas de cupratos que se fabrican con esta técnica presentan propiedades superconductoras mucho mejores que los materiales macizos correspondientes.

Se conocen numerosos métodos para la deposición de películas. En



1. HETEROESTRUCTURA de superconductores obtenida mediante ablación por láser. El dispositivo, muy utilizado en microelectrónica, consta de una capa de óxido de cobre, praesodimio y bario, en estado normal, emparedada entre dos capas superconductoras de óxido de cobre, bario e itrio (*en color ocre*). En ciertos lugares de la superficie de la película superconductora superior se ha depositado una capa de oro (*cuadrados amarillos*), que asegura el contacto eléctrico. Las dos formas diagonales son hilos situados por encima de la estructura, soldados a los conectores. Esta estructura incluida en una unión de Josephson ha sido realizada por J. F. Amet y P. Bernstein, del CRISMAT de Caen, y por F. R. Ladan, en el L2M, en Bagneux.



2. LA ESTRUCTURA de los cupratos superconductores consiste en la alternancia de bloques de *n* capas de óxido de cobre fuertemente unidas (puesto que están separados por un solo plano atómico A) y bloques que tienen la misma estructura cristalina que el cloruro sódico (BO,MO,BO). Con los métodos clásicos sólo pueden obtenerse estructuras en que *n* es inferior a 4, pero la epitaxia por secuencia impuesta de capas atómicas sucesivas permite en principio obtener cualquier estructura. La figura superior representa las variaciones de la temperatura crítica de varios compuestos de este tipo logrados mediante dicha técnica, para diversos números de planos de óxido de cobre.

los más sencillos, se coloca sobre el sustrato una gota de líquido que contiene una solución de sales de los elementos que deben componer la película; se extiende el líquido por centrifugación, y se lo calienta para eliminar el disolvente y producir el crecimiento cristalino.

Este tipo de técnicas baratas permite la fabricación de películas gruesas (de algunas decenas de micrometros de espesor) de óxido de cobre, bario e itrio, YBaCuO, que se utilizan, por ejemplo, para aislar a los circuitos de los campos magnéticos. Pero no bastan las cualidades de estas películas para la fabricación de componentes electrónicos, que requiere el depósito en atmósfera controlada.

Tal deposición puede ser continua o secuencial. Cuando los constituyentes se depositan simultáneamente (depósito continuo) a partir de fuentes elementales o de un blanco que se pulveriza, la composición está regida por la intensidad de los flujos o por la composición del blanco. En el método que utilizamos nosotros, el de epitaxia secuencial impuesta, los constituyentes se depositan en sucesivos planos atómicos. Las fuentes, consistentes en crisoles donde se evaporan hacia el sustrato los elementos, están provistas de un diafragma, cuyo tiempo de apertura permite ajustar la cantidad de materia depositada.

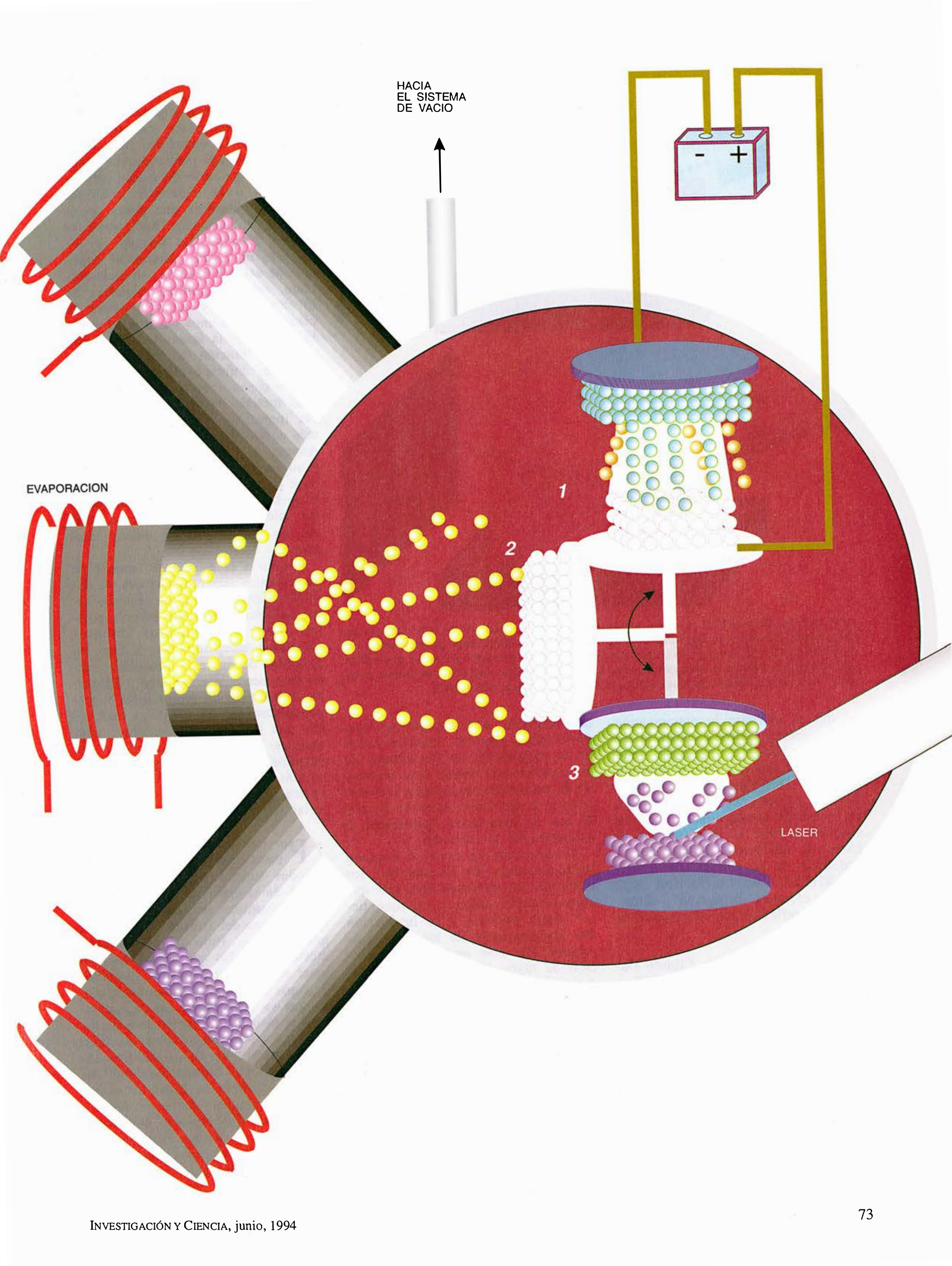
En principio este método es potente, puesto que permite forzar el crecimiento de una estructura cristalográfica particular y sintetizar compuestos que no se podrían obtener por otros métodos. Así es como varios equipos estudian sistemáticamente en cupratos del tipo $RA_{n-1}Cu_nO$ (donde A es un elemento químico y R un conjunto de planos atómicos no superconductores) las variaciones de las propiedades superconductoras en función del número *n* de planos de óxido de cobre CuO_2, o en función de los planos intermedios R, del mismo tipo cristalográfico que el cloruro sódico (la sal de mesa).

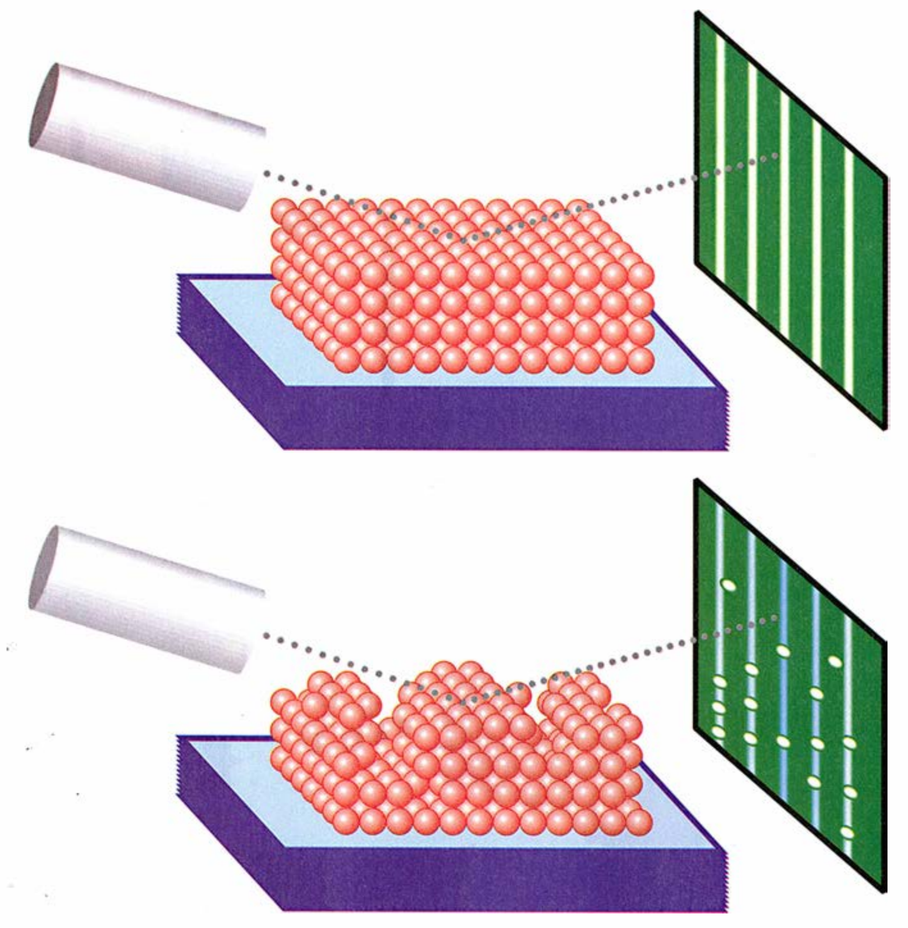
No se obtiene un buen crecimiento por sucesivas capas atómicas a no ser que se cumplan a la vez varias condiciones. En primer lugar, es preciso conseguir una buena cristalización a temperatura elevada (por encima quizá de 400 grados Celsius), pues la agitación térmica permite a los átomos depositados desplazarse en la superficie hasta colocarse según una red cristalina regular. Sin embargo, la temperatura no debe ser excesiva (inferior en todo caso, para los cupratos, a 800 grados Celsius), ya que si no los átomos depositados penetrarían en las capas formadas y destruirían la estructura en capas pretendida.

Aun cuando esté así controlada la difusión, la capa depositada no será siempre estable: a veces no "moja" las capas inferiores; disminuye la superficie de contacto con el sustrato agrupándose en pequeños granos, o precipitados tridimensionales. Esta dificultad se agrava por la posibilidad de que se formen precipitados compuestos de los diversos tipos de átomos utilizados. Con frecuencia, las fases tridimensionales son más estables que el apilamiento de las capas atómicas que se busca fabricar.

¿Queda, pues, alguna esperanza de conseguir un crecimiento por capas sucesivas? La mejor oportunidad es, sin duda, intentar que el crecimiento tridimensional se acelere disminuyendo la temperatura de depósito y haciendo que el tiempo que transcurra entre el depósito de cada capa y el de la siguiente se acorte hasta el punto

3. EL CRECIMIENTO por secuencia impuesta de capas atómicas engendra películas de excelente calidad cristalina. Los átomos enviados hacia una cara plana de un monocristal se depositan en ella por epitaxia, es decir, conservando las simetrías del cristal. Así se hacen crecer o el mismo material de que está hecho el sustrato (homoepitaxia), para obtener cristales de mejor calidad, o un material activo sobre un sustrato pasivo (heteroepitaxia), cupratos, por ejemplo, que contengan diversos elementos químicos (itrio, bario, estroncio, calcio, etcétera) sobre monocristales de óxido de titanio y de estroncio o de óxido de magnesio. Los depósitos epitaxiales pueden ser continuos o secuenciales. Los constituyentes se pueden depositar simultáneamente a partir de fuentes de los elementos por evaporación térmica (*a la izquierda*), o a partir de un blanco que se pulveriza (pulverización catódica o pulverización por láser, *a la derecha*). La composición de las capas depositadas está gobernada entonces por la intensidad de los flujos o por la composición del blanco. En los métodos secuenciales, los constituyentes se depositan por secuencias que corresponden exactamente a un plano atómico del compuesto a realizar. Cada fuente se encuentra provista de un diafragma, cuyo tiempo de apertura permite ajustar la cantidad de materia depositada.


HACIA
EL SISTEMA
DE VACIO
- +
EVAPORACION
1
2
3
LASER



4. TRAS EL DEPOSITO, a veces se forman pequeños cristales de una fase no superconductora sobre la superficie en crecimiento. Se explora esta precipitación observando la difracción de electrones proyectados rasantemente sobre la superficie: las superficies regulares generan figuras de difracción que consisten en líneas paralelas, y los precipitados producen puntos sobre la imagen difractada.

de que no permita la precipitación. Para ganar esta carrera contra la tercera dimensión, es necesario tener una herramienta que detecte instantáneamente la formación de precipitados de algunas decenas de átomos, que controla la rugosidad molecular. Esa herramienta es la difracción de haces de electrones rápidos por la superficie de la película, o técnica de RHEED (de "reflection high energy electron diffraction", difracción de reflexión de electrones de alta energía).

Desde los trabajos de Clinton Davisson y M. Germer en 1927 se sabe que, gracias a la naturaleza ondulatoria de los electrones, se puede observar la superficie de los cristales: la longitud de onda asociada a un electrón acelerado por una diferencia de potencial de 100 volts, por ejemplo, es del orden de 0,1 nanómetros, orden de magnitud de las distancias interatómicas. Las interferencias entre los haces electrónicos retrodifundidos por los átomos de un cristal conducen a una intensidad del haz reflejado nula excepto en unas direcciones precisas, características de la disposición de los átomos en la superficie del cristal. Este fenómeno de difracción electrónica es semejante a la difracción de rayos X, con la que se caracteriza igualmente la estructura de los cristales.

Mientras que los rayos X penetran profundamente en la materia, los electrones no traspasan nada más que algunas capas atómicas, porque tienen carga eléctrica y su interacción con los electrones de los átomos es intensa. Por este motivo, la difracción de rayos X y la de electrones dan informaciones diferentes: aquélla, sobre la estructura de los cristales en volumen; ésta, sobre su estructura superficial, especialmente la de la primera capa de átomos.

No hay ninguna razón, en principio, por la que la estructura de esta primera capa sea idéntica a la del volumen: el entorno de los átomos en ella es diferente, y suelen observarse estructuras distintas de la del cristal en volumen. En la práctica, un haz de electrones rápidos llega a la superficie en ángulo rasante (del orden de un grado); la imagen que los haces difractados generan en una pantalla fluorescente caracteriza la planitud de la superficie: una superficie cristalizada perfectamente plana engendra una serie de líneas perpendiculares a la superficie, mientras que una superficie que posea precipitados cristalizados hará aparecer puntos aislados. La imagen de difracción observada durante el depósito da así información, en cada instante, sobre la calidad cristalina de lo depositado y también sobre la cantidad de átomos adsorbidos sobre la superficie: la intensidad difractada oscila en función del tiempo de deposición, correspondiendo los máximos a capas atómicas completas.

El método de epitaxia por secuencia impuesta de capas atómicas es más complejo que los otros métodos. Aunque necesita un equipo más caro y su regulación es más difícil, produce películas de mejor calidad. Con él se hacen, por menos de mil pesetas, microláseres de los que se utilizan en los lectores de discos compactos.

Debido a la estructura laminar de los cupratos superconductores, la deposición por epitaxia impuesta de capas atómicas sucesivas parecía posible. Pero los primeros intentos resultaron decepcionantes: si bien las películas de cupratos obtenidas eran perfectamente planas, algo obligado en electrónica, las propiedades superconductoras de las películas elaboradas con los métodos continuos eran mejores: la temperatura crítica era superior, la transición superconductora más clara, y superior la corriente crítica, por encima de la cual el material se vuelve resistivo.

¿Por qué los métodos más rudimentarios proporcionaban prestaciones superiores? Porque es muy difícil, en la epitaxia impuesta, determinar condiciones de deposición (temperatura del sustrato, presión del gas oxidante, flujo de las fuentes, etcétera) con las que se puedan obtener eficazmente depósitos sucesivos de capas atómicas. El crecimiento plano que se investiga es un crecimiento "bidimensional". En el caso de los cupratos, sin embargo, el crecimiento es a menudo "rugoso", o tridimensional: los átomos forman montones sobre la superficie en lugar de extenderse en un plano, como se desea.

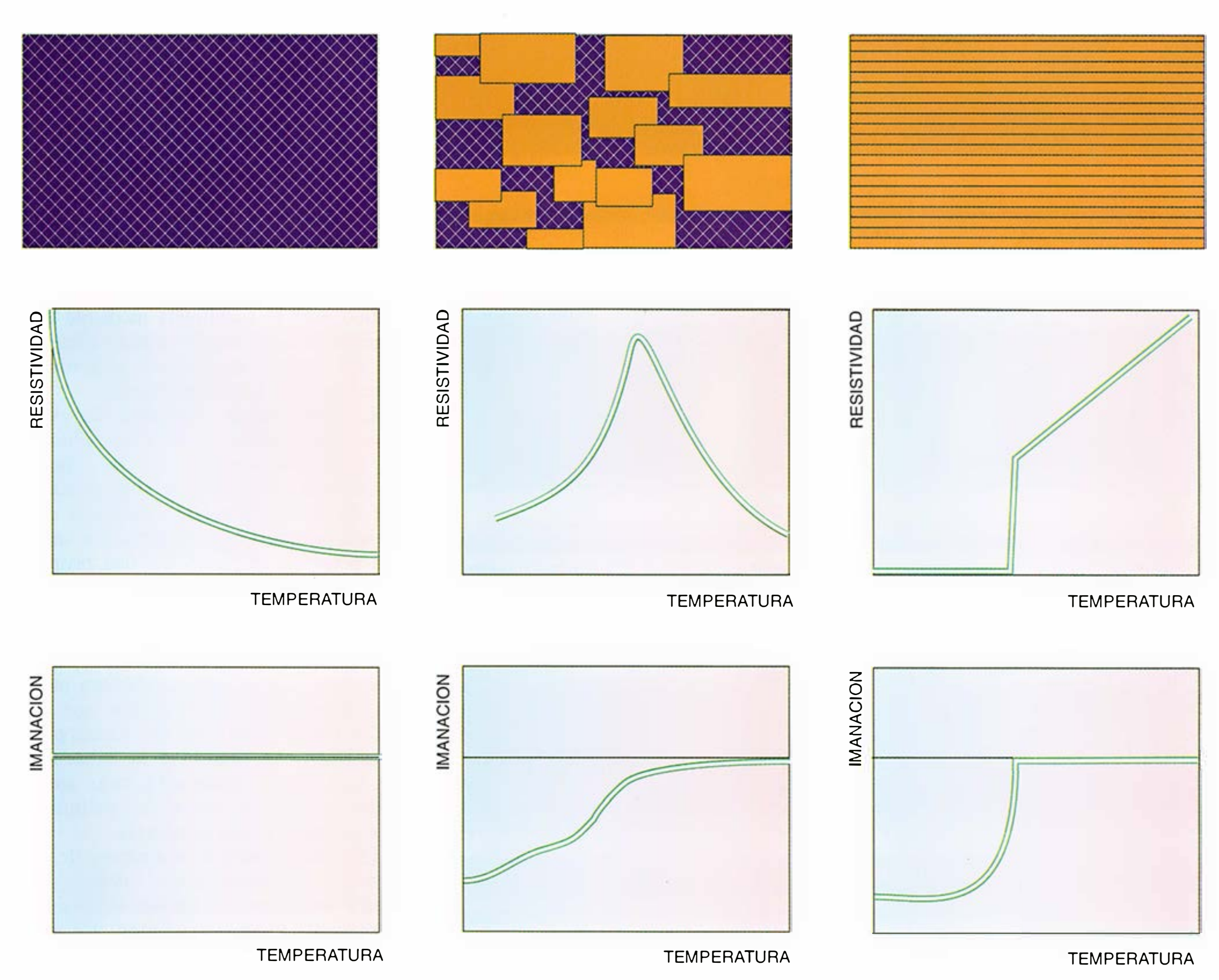
Ante las dificultades, numerosos equipos que se habían interesado en el método de las capas atómicas sucesivas de cupratos arrojaron la toalla. Pese a todo, en 1991, nuestro

equipo —en especial el investigador Xiang Zhen Xu— obtuvo con esa técnica de secuencia de capas un crecimiento puramente bidimensional del óxido de cobre, estroncio y bismuto, BiSrCuO.

El abandono de los ensayos parece, pues, que ha sido precipitado: el método de epitaxia por secuencia impuesta de capas atómicas permite el crecimiento de películas de nuevas fases de la familia de los cupratos cuyas estructuras y composiciones son más simples, pero de propiedades superconductoras más interesantes. Proponemos que se emplee la denominación "fase infinita" para referirse a esta familia cuya estructura cristalina es una alternancia de dos planos atómicos: un plano de óxido de cobre CuO_2, responsable de la superconducción, y un plano intercalar, cuya función principal es imponer al plano de cuprato una estructura cristalina y una carga eléctrica susceptibles de volverlo superconductor. Esta base es mucho más simple que la de otros cupratos superconductores de alta temperatura. como el YBaCuO, cuya base contiene seis capas atómicas, o el cuprato de mercurio HgBaCaCuO, que ostenta el récord de temperatura crítica y cuya base se compone de ocho planos atómicos.

¿Por qué no se ha investigado antes, y con más intensidad, la fase infinita? En primer lugar, el estudio de centenares de cupratos superconductores había mostrado que todos estaban compuestos de una alternancia de planos superconductores CuO_2 separados por un único plano atómico (fuertemente unidos), por una parte, y de tres o cuatro planos atómicos no superconductores, por otra. Cuando se investigaba el papel que desempeña el número n de planos fuertemente unidos, parecía que la temperatura crítica era máxima para valores de n iguales a 3 o 4, y se creía que la superconducción a alta temperatura que mostraban los cupratos estaba ligada a la bidimensionalidad del plano CuO_2 o a la de los grupos de planos fuertemente unidos.

A partir de un cierto valor de n, y *a fortiori* para la fase infinita, la superconducción tomaría un carácter tridimensional caracterizado por una temperatura crítica inferior. Al revés, sin embargo, se puede imaginar que la temperatura crítica de los cupratos aumenta de forma regular en función de n y se refuerza al mismo tiempo que se refuerza el carácter tridimensional. Falta por hacer la comparación experimental de estas dos hipótesis.



5. CIERTOS COMPUESTOS del tipo de fase infinita presentan dos características de la superconductividad: la anulación de la resistencia eléctrica y la expulsión del campo magnético. La síntesis de un nuevo compuesto superconductor conduce por lo general a una mezcla (*centro*) de fases superconductoras (*derecha*) y de fases no superconductoras (*izquierda*), de manera que se atenúan estas dos propiedades: la resistencia eléctrica disminuye progresivamente sin llegar a anularse, y la imanación varía menos que en la fase pura. Según estos criterios, el autor y su equipo de la Escuela Superior de Física y Química Industrial de París han observado signos de una posible superconductividad a 250 kelvin.

Por otra parte, los equipos que habían intentado sintetizar la fase infinita se toparon con un obstáculo importante: los óxidos de cobre y estroncio que se obtienen por métodos clásicos no tienen la estructura de la fase infinita; no contienen planos de óxido de cobre, y son aislantes. Es posible obtener en condiciones muy particulares la estructura de planos de estroncio y planos de óxido de cobre alternos, pero permanecerá metaestable; una variación brusca de la presión, de las condiciones o de la temperatura, por ejemplo, puede reorganizar el material en una fase no superconductora. ¿Cuáles son las condiciones de síntesis que permiten obtener la fase infinita?

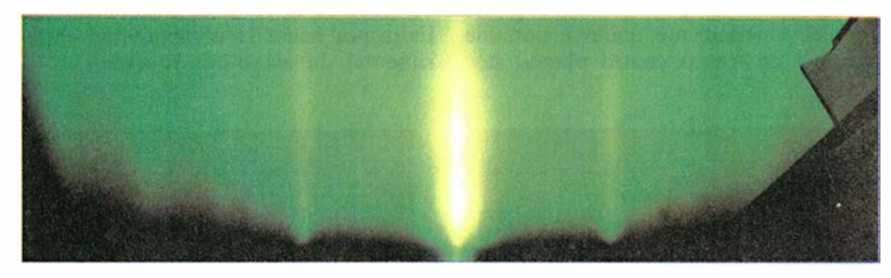
Una posibilidad consiste en sintetizar el compuesto a muy alta presión: la estructura infinita, que es metaestable a presión atmosférica, se vuelve estable a muy alta presión. Los equipos de M. Smith, de la Universidad de Austin, y, después, de M. Takano, de Kyoto, han estabilizado compuestos de fase infinita sintetizándolos a la temperatura de 1000 grados Celsius bajo presiones de 60.000 atmósferas. El material resultante es una mezcla de fases, pero al menos una de ellas, aún mal identificada, es superconductora; la temperatura crítica es de 40 kelvin para el óxido de cobre con estroncio y niobio, NbSrCuO, y de 110 kelvin para el óxido que contiene calcio y estroncio, SrCaCuO. Estos resultados establecen que la fase infinita puede ser superconductora con una temperatura crítica elevada.

Otro camino para alcanzar esta estructura consiste en depositar las capas atómicas una después de otra, a fin de forzar la generación de planos de óxido de cobre. Este método se ha experimentado con el óxido mixto de cobre, calcio y estroncio por T. Kawai, quien también ha obtenido una mezcla de fases, de las que algunas presentan signos de superconducción a una temperatura récord de 170 kelvin. En nuestro laboratorio hemos obtenido resultados similares con el mismo tipo de compuestos. Nuestros trabajos recientes con otros cupratos nos hacen esperar que se dé superconducción a una temperatura todavía superior.

Sin embargo, como T. Kawai y el resto de físicos especializados en la superconducción, no echamos las campanas al vuelo. Desde 1987 se han desmentido decenas de anuncios de materiales con elevada temperatura crítica. ¿Cuáles son los signos inequívocos de superconducción? Una fase superconductora pura presenta, por debajo de la temperatura crítica, dos propiedades esenciales: la anulación de la resistencia eléctrica y la expulsión de las líneas de campo magnético, que se manifiesta mediante una imanación aparente de sentido opuesto al del campo magnético aplicado a una muestra (diamagnetismo).

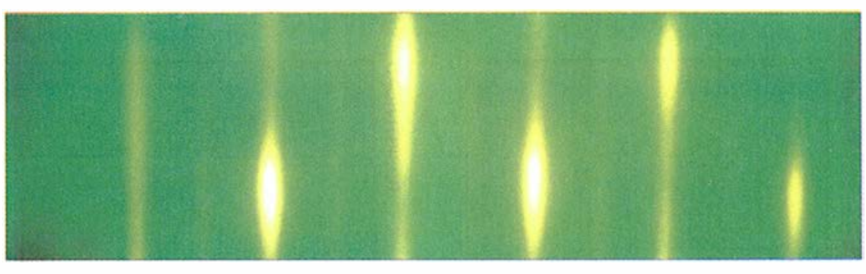
La observación simultánea de estas dos propiedades es un buen criterio de superconducción, pero la síntesis de un nuevo compuesto superconductor lleva a una mezcla de fases que tienen numerosos defectos. La mezcla presenta entonces las dos propiedades características de la superconducción, pero de forma atenuada: la resistencia eléctrica disminuye sin anularse, y la imanación varía menos que en una fase superconductora pura. La observación de tan sólo una de estas dos propiedades no basta para establecer con seguridad la existencia de una fase superconductora, sobre todo cuando se trata de películas, que contienen poca materia.

Una disminución repentina de la resistencia eléctrica por debajo de cierta temperatura puede deberse a numerosos efectos parásitos. Es más raro que el diamagnetismo a baja temperatura sea espurio. Sin embargo, si es débil, es preciso estar atento a todas las causas de error, sobre todo cuando se mide la temperatura: no se mide nunca la temperatura real de la muestra, sino la de un punto

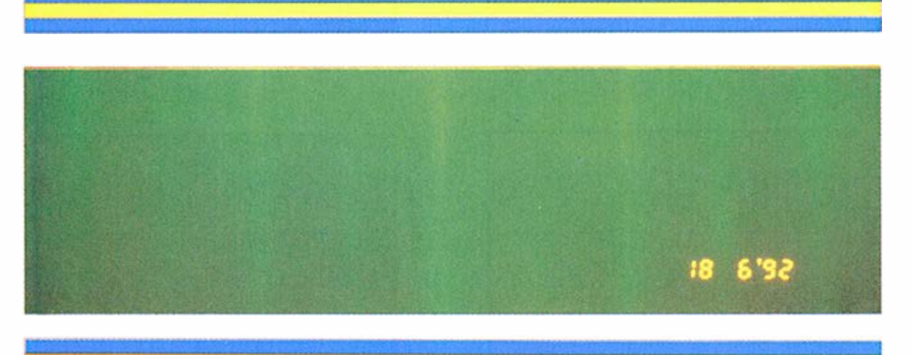


OXIDO DE BISMUTO

OXIDO DE ESTRONCIO



OXIDO DE COBRE



6. LA DIFRACCION de electrones rápidos proporciona una información preciosa sobre la cantidad de átomos depositados por epitaxia. La imagen que forman los electrones difractados caracteriza esencialmente el orden cristalino de la primera capa atómica. Cuando ésta se halla completa, el orden es máximo, al igual que la intensidad difractada. Si se mide la intensidad de la difracción durante el depósito de un elemento, se observan oscilaciones cuyos máximos corresponden a capas atómicas completas. Así se calibra el tiempo necesario para el depósito de cada capa atómica.

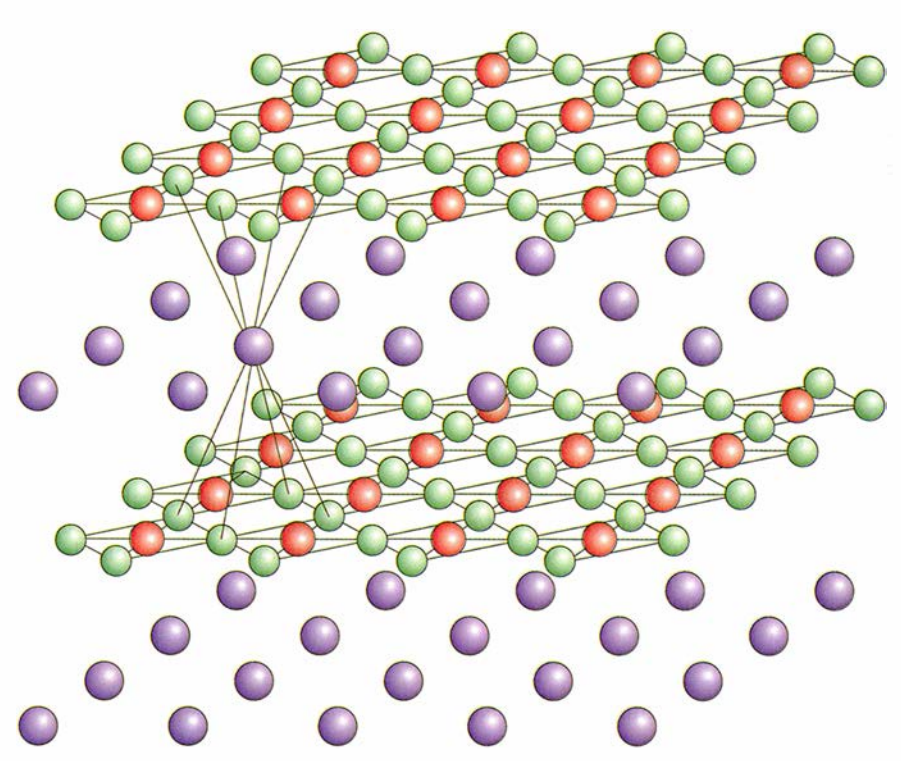
vecino, del que se supone que guarda equilibrio térmico con la muestra.

Si la diferencia de temperatura entre la muestra y ese punto próximo es constante, se puede corregir el error mediante un calibrado, pero si, por una razón física, como la condensación de un gas residual, esa diferencia se modifica repentinamente, la curva de medida de la imanación en función de la temperatura presenta un accidente que podría interpretarse erróneamente como la aparición de diamagnetismo. Para identificar las fases superconductoras, hay que observar una disminución neta de la resistencia eléctrica a la misma temperatura en que surge el diamagnetismo y reproducir sin ambigüedad ambos efectos. Y entonces deberíamos todavía purificar la fase para identificar de forma inequívoca el compuesto superconductor.

Mientras prosiguen los trabajos de síntesis e identificación de las fases superconductoras, diversos laboratorios realizan prototipos de compuestos electrónicos construidos con películas de cupratos superconductores; algunos son, por ejemplo, compuestos para sistemas de emisión, recepción y tratamiento de hiperfrecuencias, antenas o filtros, medidores de campos magnéticos y diversos tipos de transistores. La idea es que estos compuestos se refrigeren con sistemas de circuito cerrado, y no por inmersión en un fluido criogénico —como el nitrógeno líquido— al que se deja que se evapore. Recientemente, numerosos laboratorios universitarios e industriales se han interesado en unos sistemas a los que bastará con enchufar a la red para que alcancen temperaturas de 30 kelvin sin consumir demasiada energía.

No obstante, sigue siendo útil la búsqueda de temperaturas críticas aún más altas: cuanto más baja sea la temperatura de funcionamiento, tanto más costará y será más delicado poner en marcha las técnicas criogénicas. Además, las prestaciones de los superconductores son superiores cuando los sistemas se utilizan a temperaturas muy inferiores a su temperatura crítica. En general, lo indicado para obtener prestaciones óptimas es que funcionen por debajo de la mitad de dicha temperatura.

Sin embargo, en la mayoría de los superconductores fabricados con métodos clásicos subsiste un problema importante: la calidad de las interfases y de las superficies de las capas superconductoras no está bien controlada y se conoce mal; las propiedades de las uniones Josephson que se realizan (dos metales superconductores separados por una película delgada de aislante para constituir, por ejemplo, el núcleo de un transistor) son de calidad muy inferior a la que se esperaba. El depósito secuencial de películas capa atómica a capa atómica es la herramienta que permite controlar el estado de las interfases de forma óptima.



7. LA FASE INFINITA se compone de una alternancia de dos planos atómicos: un plano de cuprato (óxido de cobre CuO_2), responsable de la superconducción, y un plano intercalar (*en azul*), cuya función principal es imponer al plano de óxido de cobre una estructura cristalina y una carga eléctrica susceptible de convertirlo en superconductor (en esta figura se han exagerado las distancias entre los dos tipos de planos para una mayor claridad). Esta base es más simple que las bases cristalinas de los cupratos clásicos: el óxido mixto de cobre, bario e itrio contiene seis capas atómicas, mientras que el óxido de cobre, calcio, bario y mercurio tiene una base constituida por ocho planos atómicos. Los compuestos de la misma composición que el óxido de cobre y estroncio (representado aquí) que se obtienen por los métodos clásicos de depósito no tienen la estructura de la fase infinita: no contienen planos de óxido de cobre y son aislantes.

Las dificultades con que se tropieza en la obtención de interfases de calidad se debe en parte a la gran anisotropía de los materiales. Los compuestos análogos al óxido de cobre, calcio, estroncio y bismuto, BiSrCaCuO, por ejemplo, tienen una conductividad al menos cien mil veces inferior en la dirección perpendicular a los planos de óxido de cobre que en éstos. Por el contrario, en los compuestos del tipo de fase infinita, la distancia entre los átomos de cobre es aproximadamente de 0,39 nanómetros en los planos de óxido de cobre, y de 0,33 nanómetros en estos planos: la anisotropía debería ser inferior. Para verificarlo, queda por aislar la fase superconductora y sintetizar monocristales. Puede que el depósito secuencial por capas atómicas permita alcanzar este objetivo con mayor sencillez que por la vía de síntesis a temperatura y presión muy altas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ATOMIC LAYER BY ATOMIC LAYER GROWTH OF DyBaCuO SUPERCONDUCTING THIN FILMS. A. Schuhl *et al.*, en *Applied Physics Letters*, vol. 57, pág. 819, 1991.

COMPARATIVE STUDY OF THE POLARIZED XANES AT THE CuK-EDGE OF $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$ $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$ AND $YBa_2Cu_3O_7$. B. Poumellec, R. Cortese, S. Labdi, H. Raffy, B. Roas y C. Frétigny en *Physica Status Solidi, B*, vol. 170, pág. 653, 1992.

CONTROL OF COMPOSITION AND MICROSTRUCTURE IN HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS. J. N. Eckstein *et al.* en *MRS Bulletin*, pág. 17; agosto, 1992.

OBSERVATION OF RESISTIVE AND MAGNETIC ANOMALIES AT 90K-180K. X. Li, T. Kawai y S. Kawai en *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 31, pág. L934, 1992.

LAYER BY LAYER GROWTH OF EPITAXIAL FILMS OF $Bi_2Sr_2CuO_6$. X. Z. Xu, M. Viret, H. Tebbli, C. Deville-Cavellin y M. Laguës en *Applied Superconductivity*, vol. 1, página 755, 1993.

Ciencia y empresa

Radiobúsqueda

Sistema ERMES

Por radiobúsqueda, o buscapersonas en la denominación usual, se entiende el envío por radio de mensajes o señales convenientemente codificadas para que sean recibidas por el receptor al que van dirigidos, y sólo por él. Sus formas más conocidas son el teléfono portátil y las redes móviles.

A diferencia de otros sistemas móviles, el buscapersonas sólo permite comunicaciones unidireccionales. No por ello deja de tener su interés: son muchas las situaciones en las que el destinatario del mensaje únicamente necesita estar localizado en todo momento y lugar, para poder recibir un aviso, orden o información que no siempre ha de requerir respuesta. Los receptores tienen unas dimensiones de unos 6 × 9 × 2 cm y pesan alrededor de los 100 gramos incluida la batería.

En razón de la forma en que el receptor presenta la información se dan cuatro modalidades de servicio: de tono, numérica, alfanumérica y de voz. La *modalidad de tono*, la más sencilla de todas, alude al pitido o señal luminosa que avisa al receptor de una llamada. Suelen emplearse hasta cuatro tonos distintos o secuencias diferentes. La interpretación y localización de la llamada corre a cargo del usuario.

En la *modalidad numérica* el receptor, además de emitir un sonido, dispone de una pantalla donde aparece un número que suele corresponder al del teléfono al que debe llamar. Los receptores pueden guardar en memoria varios mensajes para su posterior lectura. En la *modalidad alfanumérica*, la más avanzada, el abonado dispone de varios símbolos, tanto numéricos como alfabéticos, en la pantalla; aparatos de esta modalidad permiten recibir mensajes de hasta 2000 caracteres y almacenar hasta 40 llamadas con un total de unos 6000 caracteres.

Por último, en la *modalidad de voz*, el aparato emite acústicamente el mensaje recibido; se trata de una modalidad en retroceso, debido al bajísimo rendimiento en cuanto al uso del espectro, comparada con las posibilidades de la versión alfanumérica en código número de radiobúsqueda POCSAG ("Post Office Standardisation Code Advisory Group") y otros. Así por ejemplo, un mensaje verbal de 15 segundos de duración ocupa unos 80 caracteres y tarda en transmitirse aproximadamente 2 segundos en POCSAG a 512 bits por segundo, y poco más de 1 segundo si es a una velocidad de 1200 bits por segundo.

El sistema técnico normalizado que goza de mayor aceptación es el

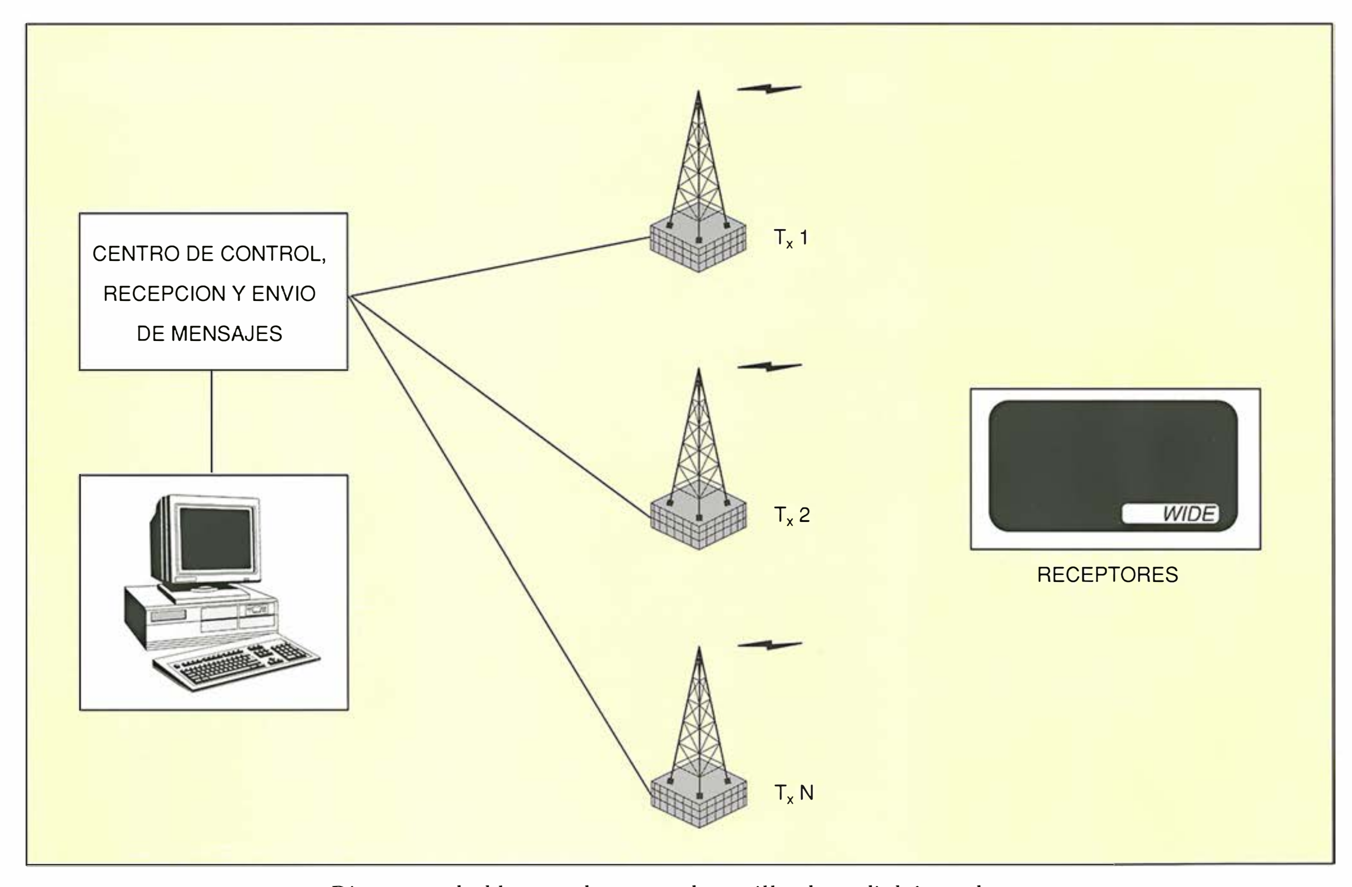


Diagrama de bloques de una red sencilla de radiobúsqueda

POCSAG, o código nº 1 de radiobúsqueda del CCIR (Comité Consultivo Internacional de Radio). El POCSAG se presenta en un doble formato digital: de 512 bits por segundo y de 1200 bits por segundo. Constituye un formato adecuado para su transmisión por radio en un canal convencional de 25 kilohertz con modulación digital MDF directa (modulación por desplazamiento directo de frecuencia).

El código POCSAG permite direccionar hasta unos dos millones de receptores. La capacidad de abonados a través de un canal de radio es de unos 14.400 a 512 baudios y de 27.000 abonados a 1200 baudios, todo ello con las condiciones de tráfico usuales.

Dentro de poco se implantará en Europa un nuevo sistema de radiobúsqueda, denominado ERMES, cuyo estándar técnico ha sido elaborado por el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicación (ETSI), en colaboración con operadores europeos, administraciones y representantes de las industrias del sector. La capacidad de tráfico de este nuevo sistema es mucho mayor que la del POCSAG u otros estándares actuales, todos ellos incompatibles entre sí. Se espera así crear un gran mercado y abaratar los precios de los receptores y del servicio.

El sistema ERMES trabaja a un régimen binario de 6250 baudios. Así, para la versión alfanumérica y suponiendo una longitud media de mensajes de 100 caracteres y 0,1 mensajes por abonado en la hora cargada, permite atender unos 127.000 abonados por canal. Desde el punto de vista radioeléctrico, ERMES funciona en la banda 169,4 a 169,8 megahertz, dispone de 16 canales de 25 kilohertz; la modulación es del tipo 4 PAM/FM con conformación de pulsos (una modulación digital de frecuencia en la que la señal moduladora son pulsos que pueden tener cuatro niveles de amplitud.

Otra de las novedades del sistema estriba en la posibilidad de seguimiento internacional, gracias a la cual los usuarios no necesitarán cambiar de receptor en su movimiento por Europa. La flexibilidad del sistema permite que cada país le destine el número de canales que sean necesarios (hasta 16) en función de la demanda, pudiendo realizarse el seguimiento internacional aun cuando estas frecuencias no sean las mismas en diferentes países.

Comporta también un ahorro de batería en los receptores, que pasa de ser 8 a 1 a ser aproximadamente a 150 a 1. El formato POCSAG contempla la división del tiempo para cada lote de bits en 8 tramas, permitiendo que el receptor esté conectado únicamente durante una de estas tramas cuando no recibe un mensaje para él. De esta manera se ahorra consumo de batería en la proporción indicada de 8 a 1. En el caso del ERMES son válidas las mismas consideraciones, pero en este caso la proporción de tiempo en que el receptor permanece conectado tan sólo es de 1 a 150, con lo que el ahorro de batería es mucho mayor. La vida útil de la batería, antes de un mes, se alarga más de un año. Además, se obtiene un gran aumento del número de identidades de abonados disponibles: los dos millones de usuarios del POCSAG se convierten en unos 3400 millones del nuevo sistema. Desde el punto de vista de su normalización española, el sistema ERMES está contemplado en la nota UN-24 del Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF), reservándosele la banda de 400 kilohertz del espectro de frecuencias.

En España, el servicio de radiobúsqueda se presta localmente en casi todas las capitales de provincia y sus zonas de influencia, así como en las poblaciones más importantes. Existen ya 58 concesiones de este tipo. Los sistemas locales pueden trabajar con potencias de hasta 50 watts por emisor sin limitación del número de estaciones. Para las redes nacionales, el límite de potencia autorizada para cada emisor es de 250 watts, siempre que las condiciones de compatibilidad radioeléctrica con otras instalaciones lo permitan.

Además de los operadores locales, hay en España tres operadores de ámbito nacional. Entre todos, se estima que el número de abonados en nuestra nación es de unos 130.000 a 150.000, cifra que indica un índice de penetración bajo comparado con otros países europeos. La difusión que está experimentando este servicio, junto con la liberalización del mismo, propician que su penetración aumente en los próximos años.

AÑO 1992	EUROPA	EE.UU.	JAPON	ESPAÑA	RESTO DEL MUNDO
CELULAR TMA	1,4%	3%	0,7%	0,4%	0,25%
RADIO MOVIL	1,5%	6,1%	4,4%	0,4%	0,5%
RADIO-BUSQUEDA	0,7%	5,2%	5,2%	0,3%	0,15%
TOTAL	3,6%	14,3%	10,3%	1,1%	0,9%

Indices de penetración, a finales del año 1992, de varios servicios móviles en Europa, Estados Unidos, Japón, España y el resto del mundo

JUAN CAÑAS SANTOS
Dirección General
de Telecomunicaciones. Madrid

Cardiopatías

Tratamiento infrautilizado

Un agente trombolítico puede salvar su vida en caso de que sufra un infarto. Pero si es usted una persona mayor o tarda en llegar al hospital, sus posibilidades de conseguirlo merman drásticamente. Puede ocurrir, además, que, habiéndosele hospitalizado a tiempo, deba esperar hora y media antes de que se les administre el trombolítico, un retraso que reduce significativamente la eficacia del fármaco.

La estreptoquinasa, el activador del plasminógeno tisular (APT) y otros trombolíticos disuelven los coágulos de sangre que bloquean las arterias coronarias y causan los infartos. Aunque algunos afirman que la administración de estos agentes durante la hora siguiente al comienzo del dolor torácico reduce la mortalidad en un 90 por ciento, la mayoría de los cálculos sitúa la ventaja en un 50 por ciento. Pero la eficacia decae con el retraso del tratamiento, y la mayoría de los pacientes tardan más de cuatro horas en arribar a una sala de urgencias, después del comienzo del ataque. Pese a todo, los trombolíticos reducen la mortalidad en un 30 por ciento si se administran durante las seis primeras horas y en torno al 15 por ciento entre la sexta y la duodécima hora.

Estos fármacos, sin embargo, tienen el doble inconveniente de promover hemorragias y elevar las probabilidades de un accidente cerebrovascular. Los médicos se han limitado a prescribir anticoagulantes a pacientes con óptima relación entre beneficio y riesgo. “Hay que andarse con sumo cuidado

antes de atentar contra el mecanismo de la coagulación sanguínea", advierte H. Vernon Anderson del hospital clínico de la Universidad de Texas.

En otoño del año pasado, Anderson y James T. Willerson, del Instituto de Corazón de Texas en Houston, señalaban, en el *New England Journal of Medicine*, la prudencia de los médicos en ese terreno. El 30 por ciento de los enfermos con ataques cardíacos no reciben una terapia trombolítica, porque llegan al hospital más de seis horas después del inicio del dolor. Dado que los ancianos tienen un mayor riesgo de accidente cerebrovascular, se desaconseja su aplicación en un 15 por ciento de los casos debido a lo avanzado de su edad y en otro 25 por ciento porque del electrocardiograma no abona la presumible eficacia del fármaco o por manifiesta propensión a las hemorragias.

¿Pecan de excesiva cautela estos criterios? La mortalidad de los pacientes sometidos a tratamiento trombolítico en ensayos clínicos oscila entre el 2 y el 10 por ciento; la de los excluidos de la terapia, entre un 15 y un 30 por ciento. Estas alarmantes cifras sugieren que, salvo que los riesgos de accidente cerebrovascular y de hemorragia fueran mucho más altos en los grupos excluidos (una suposición cuestionable cuando hablamos de personas que simplemente han llegado demasiado tarde), dichos pacientes se habrían beneficiado también de un tratamiento trombolítico. Anderson y Willerson anotan que los pacientes mayores de 75 años estaban entre los grupos que más se beneficiaron en los ensayos clínicos porque son los que más sufren ataques cardíacos.

Para Andrew J. Doorey, del Hospital de Delaware, el tratamiento trombolítico estaría indicado en el 60 por ciento de las ocasiones. Con Eric L. Micheson, de la Universidad de Hahnemann, y Eric J. Topol, de la Fundación de la Clínica Cleveland, llegó a la conclusión de que el uso extendido de estos fármacos podría triplicar el número anual de vidas salvadas.

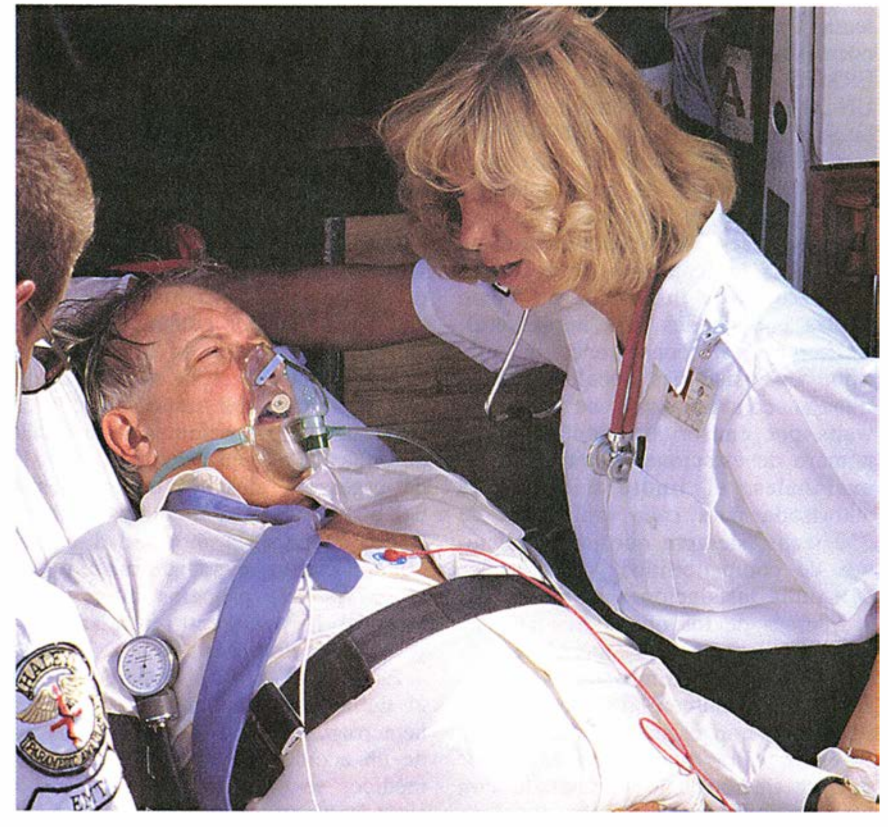
En el bando de los partidarios se insiste en que hubo siempre pruebas convincentes para un uso más generoso de trombolíticos; por lo menos desde 1988, cuando se publicó el segundo estudio internacional de supervivencia al infarto (ISIS-2). Muchos médicos europeos comparten la justificación del uso agresivo de anticoagulantes. En un artículo reciente de *Lancet* se afirmaba que algunos hospitales ingleses habían prescrito terapia trombolítica al 85 por ciento de los enfermos con ataque cardíaco. Pero advertía, asimismo, que esta práctica variaba de un hospital a otro; los había que recurrían a esos fármacos tan sólo con la mitad de frecuencia.

"Es difícil conocer el grado de infrautilización", dice Topol. Para los pacientes mayores de 75 años, el porcentaje de tratamiento ha saltado, en dos años, del 2 al 15 por ciento. Las historias clínicas procedentes del ensayo de utilización general de estreptoquinasa y APT para las arterias ocluidas (GUSTO), que él supervisaba, sugerían que "estamos tratando muy por encima del 80 por ciento de los pacientes apropiados".

Pero Rory Collins, de la Universidad de Oxford, disiente de esta opinión: "EE.UU. estaba por debajo del extremo inferior y el R.U. por encima del superior" en frecuencia de uso de trombolíticos. "Creo que muchos médicos todavía dudan sobre la conveniencia de tratar después de las seis horas", aventura. "Esto está cambiando, pero quizás a diferentes ritmos según los lugares".

La resistencia a administrar un tratamiento que causa la muerte a uno de cada 1000 pacientes es comprensible en una profesión que se rige por el mandato *primum non nocere,* "lo primero, no dañar". Los internistas de las salas de urgencias deben tomar decisiones rápidas, basadas en una información incompleta, sobre la atención de pacientes que no han visto nunca. Suelen valorar su propia experiencia y la de sus colegas mucho más que las historias clínicas, lo que puede explicar por qué el uso de trombolíticos tiende a ser mayor en los hospitales que han participado en los ensayos clínicos. El miedo a demandas judiciales se ha convertido, además, en una auténtica obsesión.

La mayoría de los expertos sí están de acuerdo en que la terapia debe administrarse cuanto antes. Los estudios demuestran que, desde el momento en que los pacientes llegan a una sala de urgencias, deben esperar una media de unos 85 minutos para recibirla. Este retraso no sólo reduce el beneficio de los anticoagulantes, sino que en algunos hospitales coloca a los pacientes fuera del intervalo aceptado para el tratamiento. Lo ideal sería acortar ese intervalo a un máximo de 20 minutos. Algunos han sugerido que la terapia trombolítica podría empezarse en las ambulancias de camino al hospital, pero los beneficios de esta controvertida práctica son inciertos. "Estamos hablando de una reducción de hasta el 90 por ciento de la morta-



Los trombolíticos disuelven los coágulos que bloquean las arterias coronarias y causan los infartos. Pero la terapia no siempre llega a todos y a tiempo

lidad causada por el mayor asesino del mundo occidental", insiste Doorey. "Creo que es el mayor avance médico de este siglo, después de los antibióticos". Pero no podrá demostrar su potencial a menos que los médicos lo usen más a menudo.

JOHN RENNIE

Electrocristalización

Atomo a átomo

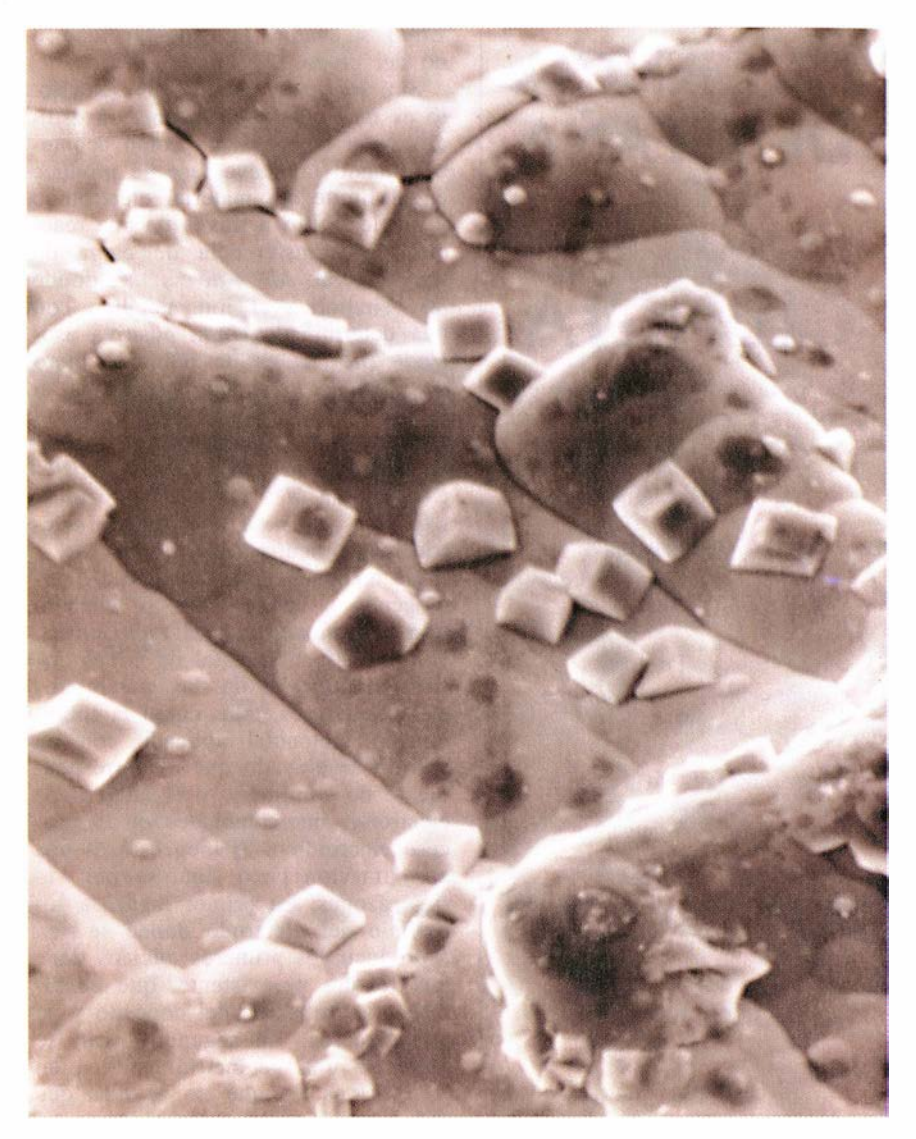
Salvo en contadas excepciones, resulta muy difícil y muy caro usar una pieza para joyería, cirugía o cualquier otra aplicación industrial, fabricada en platino, oro, plata u otro metal precioso, que sea completamente pura. Se trata, sin embargo, de metales insustituibles en multitud de procesos industriales, como hidrogenaciones, obtención electrolítica de cloro y otros.

Ante esos inconvenientes de índole económica, la investigación se ha centrado en los procesos de electrolisis: modificando la naturaleza del baño electrolítico o de los electrodos, se ha obtenido el crecimiento electrolítico de dichos metales sobre substratos de igual o diferente naturaleza, de espesor variable y con un grado de homogeneidad y adherencia al electrodo que los han hecho capaces de sustituir a los metales puros.

Los científicos se han propuesto conocer los diversos aspectos que intervienen en el fenómeno de la electrocristalización, o formación de un depósito electrolítico metálico. ¿De qué etapas consta? Podríamos reducirlas a dos: formación del depósito y cristalización. La primera sería la marcha que los iones (átomos o moléculas con carga eléctrica asociada) del baño electrolítico emprenden para llegar al electrodo al ser atraídos electrostáticamente e incorporarse a su red metálica cristalina; la segunda comportaría el proceso de cristalización propiamente dicho.

El depósito y el substrato pueden ser de la misma o de distinta naturaleza. En ambos casos, es necesario que, cuando los iones formen uno a uno el depósito, lo hagan con una ordenación adecuada; y ello, ya sea para contribuir a crecer los cristales del metal semejante que le sirve de soporte, ya sea para originar un cristal de diferente naturaleza, lo que implica ordenación espacial.

Con respecto a los pasos que el ion necesita salvar en su camino hasta llegar a la superficie electródica para depositarse, importa atender a la reacción de transferencia de su carga, cuando llega a la interfase electrizada entre metal (electrodo) y disolución (electrolito); pero debe considerarse también la pérdida, total o parcial, de la esfera de solvatación (moléculas del disolvente que lo envuelven).



Depósito y cristales de rutenio sobre un substrato de cobre a partir de un baño electrolítico de cloruro de nitrosilo de rutenio ($Ru(NO)Cl_3$) con 3000 aumentos, obtenido a intensidad constante

En relación con la pérdida de la esfera de solvatación, se han realizado cálculos del calor de activación que prueban la presencia de iones adsorbidos sobre la superficie del electrodo, constituyendo *ad-iones*. Cuando se produce la reacción de transferencia de carga y tiene lugar la adsorción del átomo, ya sin carga, sobre la superficie electródica, se admite la figura del *ad-átomo*, es decir, átomos neutros adsorbidos superficialmente en el electrodo.

El proceso de electrocristalización puede asimilarse al que experimenta un sistema de un solo componente que resulta del crecimiento de la fase sólida a partir de su fase vapor sobresaturado. Habrá un momento en que se establezca el equilibrio entre ambas fases y se pueda evaluar la energía libre total de Gibbs, asociada al crecimiento de la fase sólida en función de la presión de sobresaturación del vapor.

Para simplificar los cálculos en este caso de sistema homogéneo (nucleación homogénea), se ha supuesto que, en la formación de núcleos sólidos de crecimiento, se generan gotas esféricas, y se ha admitido que éstas se producen siempre que se constituyan centros estables de crecimiento cuyo radio exceda un valor crítico. Y en función de ese *radio crítico* se deduce el valor de la energía libre total de Gibbs crítica, que es la variable termodinámica que representa, según sea negativo o po-

sitivo su valor, la espontaneidad o no del proceso.

Sin ser este tratamiento sencillo, lo es más que si el sistema en estudio fuera heterogéneo, como acontece cuando la nueva fase se produce en el límite del material electródico y el electrolito a través de una reacción de transferencia de carga de tipo general: $M^{n+} + ne \leftrightarrows M$, donde M^{n+} simboliza el ion metálico con una determinada carga positiva asociada (n+), n es un número entero de pequeño valor que representa el estado de valencia en que el metal se encuentra, M es el metal en estado neutro y e los electrones transferidos al ion M^{n+} en un número igual a n para que pase a su estado eléctricamente neutro (M).

Al comparar ambos sistemas, homogéneo y heterogéneo, se encuentran expresiones para el radio crítico y la energía libre total de Gibbs crítica en función de los parámetros electroquímicos, tales como la sobretensión, potencial aplicado con un valor más elevado que el correspondiente de equilibrio, y el número de electrones intercambiados en el proceso electródico. Si bien esto es una aproximación poco rigurosa por varias razones. En primer lugar, la superficie del electrodo donde se van a producir los primeros núcleos tiene una textura preexistente, que condiciona la formación del depósito y su cristalización. En segundo lugar, se parte de una geometría esférica en los núcleos, lo que no es más que una simplificación del problema.

Pero se han obtenido electrocristalizaciones en espiral, en escalones, con cristales unidireccionales, en dendritas y otras, que aumentan la complejidad del tratamiento macroscópico cuando a la evaluación de los parámetros electroquímicos se le añade la de los geométricos. En un nivel microscópico, el proceso de electrocristalización implica la incorporación de átomos en la superficie cristalina del electrodo; aun cuando éste fuese un monocristal, no suele presentar una superficie absolutamente uniforme en la ordenación espacial de sus átomos.

Los metales portan defectos estructurales: átomos adsorbidos individualmente o en racimos, escalones, ángulos en los planos atómicos, huecos en los escalones y huecos en sus planos de simetría. Detengámonos en los planos. En el metal, el número de coordinación cúbica (m), número de átomos del plano que rodea al átomo incorporado, toma valores desde $m = 1$, 2, 3, 4, y 5 respectivamente. De todas estas posibilidades, las más favorables energéticamente, es decir, aquellas que implican menor energía, serán las que hagan que el átomo nuevo, de igual o diferente naturaleza, esté rodeado del mayor número posible de otros átomos, por lo que se situará más fácilmente en una posición como $m = 5$, ya que una ordenación atómica completa es una formación estable.

En el proceso de electrocristalización podemos provocar todas las etapas y formaciones mencionadas por aplicación de un impulso de corriente constante (método galvanostático) o de un salto de potencial (método potenciostático).

Pero la formación de los núcleos críticos puede tener otras etapas añadidas. Es frecuente que la reacción de transferencia de carga en la interfase electrodo/electrolito no se realice de forma total y el resultado no sea, en consecuencia, un átomo neutro, sino una especie con una carga residual; en cuyo caso, la carga residual le hace retener total o parcialmente su esfera de solvatación. Para que el átomo alcance en el substrato una posición energéticamente favorable y pase a ser ad-átomo, tiene que ir perdiendo, en un proceso de difusión superficial, parte de las moléculas que le solvatan hasta encontrar un escalón o un hueco para incorporarse a la red del substrato. En este momento su carga es prácticamente nula y pasa a ser ad-átomo.

En la difusión superficial, los ad-átomos van adaptándose a las irregularidades del soporte. Puede tratarse de elevaciones o depresiones en su ordenación atómica que se transmiten en todo su volumen; llamadas *dislocaciones*, éstas pueden tener forma de tornillo, de macro o microescalones y de dendritas. Tales formaciones guardan relación con la mayor o menor concentración del baño electrolítico.

La obtención de buenos depósitos electrolíticos requiere, además, someter los electrodos metálicos sólidos a tratamientos de pulido, ya sea mecánico, químico, electroquímico o combinación de ellos inmediatamente antes de proceder a la electrólisis. Debiéramos completar el repaso a los aspectos microscópicos y morfológicos de la electrocristalización con el estudio de la cinética o velocidad de formación de los núcleos críticos por unidad de tiempo, sin olvidarnos de la ordenación espacial, que da lugar a un crecimiento uni—, di— o tridimensional.

Mª. J. GONZALEZ-TEJERA
Universidad Complutense. Madrid.

Taller y laboratorio

Nicholas Kurti y Hervé This-Benckhard

Ciencia en la cocina

En el artículo que publicamos en este mismo número, aludimos a cómo determinar cuantitativamente el mejor procedimiento para conseguir un suflé. Comentarios efectuados en un seminario celebrado en Erice apuntaron a que no era esencial colocar el suflé en el horno inmediatamente después de introducir y remover las claras de huevo batidas. Puede dejarse durante una hora en un baño maría a 40 grados. Además, las mezclas para suflé de ración individual pueden congelarse y descongelarse para cocinarlas, lo cual puede resultar de gran ayuda a la hora de preparar una comida o un banquete de muchas personas.

El lector puede poner a prueba estas hipótesis con los suflés de queso. Necesitamos un tercio de taza (75 gramos) de mantequilla, unos dos tercios de taza (75 gramos) de harina, una taza y dos tercios (0,4 litros) de leche, cuatro yemas de huevo, cuatro claras de huevo y media taza (50 gramos) de queso rallado, gruyère por ejemplo. (Aunque damos las cantidades en las medidas culinarias habituales, para más precisión recomendamos las unidades métricas.) Añádanse sal, pimienta y nuez moscada a voluntad. Estos ingredientes colmarán cinco moldes de suflé individuales de unos 10 centímetros de diámetro y 6,5 centímetros de alto. Asegúrese de que los moldes están untados de mantequilla y cubiertos de miga de pan o harina.

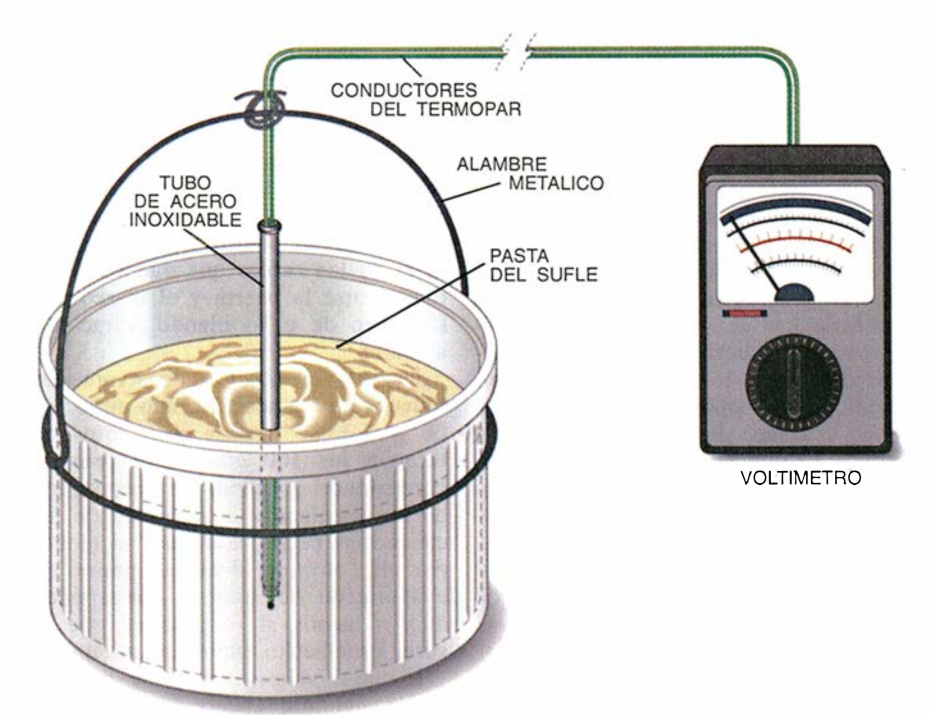
Lo primero que necesitamos es la salsa besamel. Para hacerla, a calor medio fundimos la mantequilla en un cazo y después añadimos la harina mientras agitamos. Al microscopio, los gránulos de almidón se presentarán apretados unos contra otros. Añada leche caliente al cazo (las moléculas de almidón no se disuelven fácilmente en leche fría) y agite hasta que la mezcla adquiera consistencia cremosa y espesa. Los gránulos de almidón, vistos al microscopio, se han hinchado considerablemente. Este hinchamiento constituye una causa de la viscosidad de la salsa besamel: los gránulos no pueden moverse libremente. Otra causa es que el almidón libera polímeros de cadena larga formados por glucosa, los cuales facilitan la creación de una estructura de gel. Los polímeros, demasiado pequeños para verlos con el microscopio, son la amilosa (cadenas lineales) y la amilopectina (cadenas ramificadas).

Retire el cazo del fuego y añada el queso agitando. Cuando la mezcla se haya enfriado hasta los 50 grados (la salsa debe percibirse tolerablemente caliente al tacto), agregue las yemas. Puede añadirlas una a una en un experimento, de dos en dos en otro experimento y las cuatro juntas en un tercer experimento, para comprobar o no las diferencias de que hablan algunos libros de cocina.

Bata las claras en un cuenco limpio hasta conseguir una espuma espesa (debe ser capaz de aguantar un huevo entero). Si de tanto en tanto examina la espuma al microscopio, verá que las burbujas de aire introducidas por el batido se van haciendo más pequeñas y más numerosas conforme se espesa la espuma. La explicación de por qué unas burbujas más pequeñas producen una espuma más estable hay que buscarla en la tensión superficial. Esta fuerza, la misma que crea el menisco en la superficie del agua contenida en un vaso, hace que las burbujas de aire se atraigan fuertemente unas contra otras e impide que el agua se escurra de las paredes de las burbujas. A la larga, la gravedad acabará desestabilizando las claras batidas.

Sobre esta espuma de claras vierta poco a poco la mezcla del queso. Con una cuchara reparta luego la mezcla entre los cinco moldes para suflé de modo que llegue hasta unos dos tercios de la altura de los costados.

En cada suflé hemos de medir su temperatura interna durante la cocción, la altura que alcanza y la velocidad con que se hunde después de retirado del horno. Estos parámetros le ayudarán a determinar el tiempo que puede dejarse transcurrir desde que se reparte la mezcla entre los moldes hasta que se introducen éstos



1. La temperatura del suflé es captada por los conductores del termopar. Se hallan éstos enhebrados por dentro de un tubo de acero inoxidable y sujetos por una alambre metálico rígido que se arrolla en torno al molde y forma un arco sobre el mismo. Las variaciones de tensión eléctrica revelan la temperatura

en el horno. Si su horno está provisto de una ventana, le puede resultar interesante medir la altura que el suflé alcanza a medida que se cuece; lo logrará sujetando al molde una regla metálica mediante un alambre.

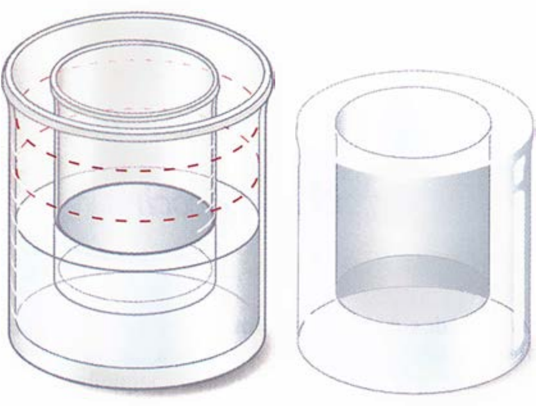
Introduzca en seguida en el horno uno de los suflés. El segundo métalo en un baño maría a 40 grados durante 45 minutos. El tercero déjelo a la temperatura ambiente de dos a cuatro horas. Ponga el cuarto en el frigorífico durante cuatro a seis horas y deje que se caliente hasta la temperatura ambiente, durante dos horas, antes de pasarlo al horno. Por fin, el último guárdelo en el congelador durante 12 a 48 horas y deje que se descongele durante seis horas antes de cocerlo. En todos los casos, el horno deberá haberse precalentado a 180 grados.

El instrumento que se emplea para registrar la temperatura dentro del suflé durante la cocción recibe el nombre de termopar, que consiste en dos alambres de metales diferentes unidos en un punto. La temperatura la mide en función de la variación de tensión eléctrica entre ambos hilos conductores.

Para construirse un termopar, adquiera hilos de cobre y constantán de unos 0,2 milímetros de diámetro con un aislamiento capaz de resistir temperaturas de 200 grados. Recurra a la soldadura por puntos para unir los hilos conductores, aunque probablemente baste con soldadura de estaño ya que la temperatura del suflé no rebasa los cien grados.

El termopar puede sumergirse directamente en la pasta del suflé. Nosotros preferimos ensartarlos por el interior de un tubo de acero inoxidable de pared delgada, con lo que conseguimos centrar mejor los hilos dentro del suflé. El tubo se recomienda que tenga de 1,5 a 2 milímetros de diámetro y de 40 a 50 milímetros de longitud. Una buena solución es una aguja hipodérmica. Fije el punto de unión entre los hilos a la punta de la aguja con una resina epoxídica refractaria al calor.

Para registrar la temperatura, conecte los hilos del termopar a un voltímetro que pueda medir a los 50 microvolts. La tensión será proporcional a la diferencia de temperatura entre la unión sumergida en el suflé y el voltímetro. Para calibrar el termopar, lea el voltímetro para agua helada (a cero grados) y para agua hirviente (a cien grados). Si la lectura a cero grados es negativa, invierta la posición de los cables en los bornes del voltímetro. Con esos dos puntos, le será fácil calcular la temperatura correspondiente a cualquier tensión leída en el voltímetro. Esta es función lineal de la temperatura. En el caso del termopar cobre-constantán, a cada grado centígrado de elevación de temperatura le corresponde un aumento de 42 microvolts. En los de cromel-alumel, es de 40 microvolts.



2. Para crear un alma de hielo, se llena con agua el espacio entre dos vasos de laboratorio. Hay que solidificar por etapas el agua para que no se agrieten los vasos

El suflé, al montarse, puede mover el termopar; hemos, pues, de asegurarlo al molde. Para ello, arrolle un alambre metálico rígido en torno al molde, doblándolo y formando con él un arco por encima del modo que se indica en la figura 1. El arco tendrá una altura de 100 milímetros por lo menos. Con un trozo de alambre metálico puede atar los hilos del termopar al arco.

Para que los hilos del termopar no se estropeen al cerrar la puerta del horno, conviene protegerlos con un manguito de tela de fibra de vidrio de dos o tres milímetros de diámetro. Otra solución podría ser envolver la zona de los cables que queden prendidos entre la puerta y el marco con un trozo de paño blando refractario al calor.

Durante la cocción observará dos rellanos de temperatura, uno entre los 60 y los 80 grados y el otro en torno a los 100 grados. El primero corresponde al punto de coagulación de las proteínas o a la subida de las capas frías de la pasta hasta el termopar. El otro se debe al punto de evaporación del agua y corresponde más o menos al instante en que el suflé está hecho (unos 20 minutos).

El suflé sube a causa de la dilatación del aire encerrado en la miríada de burbujitas que se formaron al batir los huevos. La evaporación del agua facilita también el ascenso. La coagulación de las proteínas mantiene hinchado el suflé después de la cocción porque el proceso endurece las paredes de las burbujas. Coagulación que además pudiera explicar por qué el suflé se estropea si el horno se abre antes de tiempo. Las paredes de las burbujas pudieran adquirir rigidez suficiente para oponer resistencia a la subida.

Hecho el suflé, mida su altura máxima. Comparando las alturas que alcanzan los distintos suflés y el tiempo que tardan en hundirse, se convencerá de que las recetas clásicas están en lo cierto cuando prescriben cocer los suflés inmediatamente. Cuanto más se tarde en cocer después de verter la pasta en el molde, tanto peor sale el suflé.

Este experimento cuantifica y explica las observaciones efectuadas por generaciones de chefs. Pero la ciencia y la técnica pueden también crear platos nuevos, como ilustra el horno de microondas. En la cocina tradicional, el calor penetra lentamente en los alimentos. El sabor y la consistencia dependen de la temperatura que, durante la cocción, alcanzan las distintas porciones del plato. Por ejemplo, en un panecillo recién hecho la corteza habrá llegado o rebasado los 200 grados, pero la miga no sube mucho por encima de los 80 grados, porque las burbujas de aire internas aíslan la masa.

Por contra, las microondas penetran uniformemente en el alimento. Las ondas electromagnéticas comunican parte de su energía a las moléculas y las ponen en movimiento, el rozamiento entre moléculas vecinas genera calor. Para que un horno de microondas funcione, el alimento debe contener moléculas polares; es decir, las cargas eléctricas de sus moléculas deben estar distribuidas asimétricamente. Además, la sustancia que se cocina no debe ser del todo sólida: si las moléculas están inmovilizadas, no podrán moverse en reacción a las microondas.

Ambos hechos pueden ponerse de manifiesto con plana sencillez. Empecemos por comparar los comportamientos de la parafina líquida, compuesta por moléculas no polares, y del glicerol, constituido por moléculas polares. En el horno de microondas, el glicerol entra rápidamente en ebullición, pero la parafina apenas se calienta.

La diferencia entre los estados líquido y sólido se evidencia con el siguiente experimento. Hagamos un bloque de hielo hueco introduciendo un vaso de laboratorio de cuatro centí-

metros de diámetro dentro de otro más ancho, de unos ocho centímetros de diámetro. El espacio entre ambos lo llenamos de agua y los metemos en el congelador. Para que los vasos no se agrieten, congelaremos el agua por etapas, añadiendo de ocho a diez mililitros de agua cada vez. Cuando haya una cantidad de hielo suficiente, los vasos se separan del hielo colocándolos bajo un chorro suave de agua tibia. Introduzca entonces un vaso de laboratorio pequeño, lleno tres cuartos, en el interior del bloque de hielo. Dentro de un horno de microondas, el agua entrará en ebullición en unos 30 segundos, pero el hielo seguirá sólido y sin fundirse.

Este experimento del bloque de hielo constituye el fundamento real para invertir las características de un alaska tostado. También llamado, por razones obvias, florida helado, un alaska tostado invertido se compone de una envoltura de merengue rellena de una mixtura rica en alcohol y azúcar y recubierta de chocolate glaseado. Para hacer la envoltura de merengue se bate una clara de huevo a punto de nieve y, entonces, se añaden poco a poco unos dos cucharones (25 gramos) de azúcar granulado. Se prosigue el batido hasta que la espuma sea firme (unos cinco minutos) y luego se añaden, removiendo, un cucharón y dos tercios de azúcar glaseado muy fino.

La mezcla se deposita formando cuatro porciones redondas sobre una plancha de hornear cubierta de papel de cera (una clara de huevo da para dos floridas helados). Cada disco debe tener de 50 a 60 milímetros de diámetro y un espesor de cinco a diez milímetros. Estos discos sirven como tapas y fondos de las envueltas de merengue.

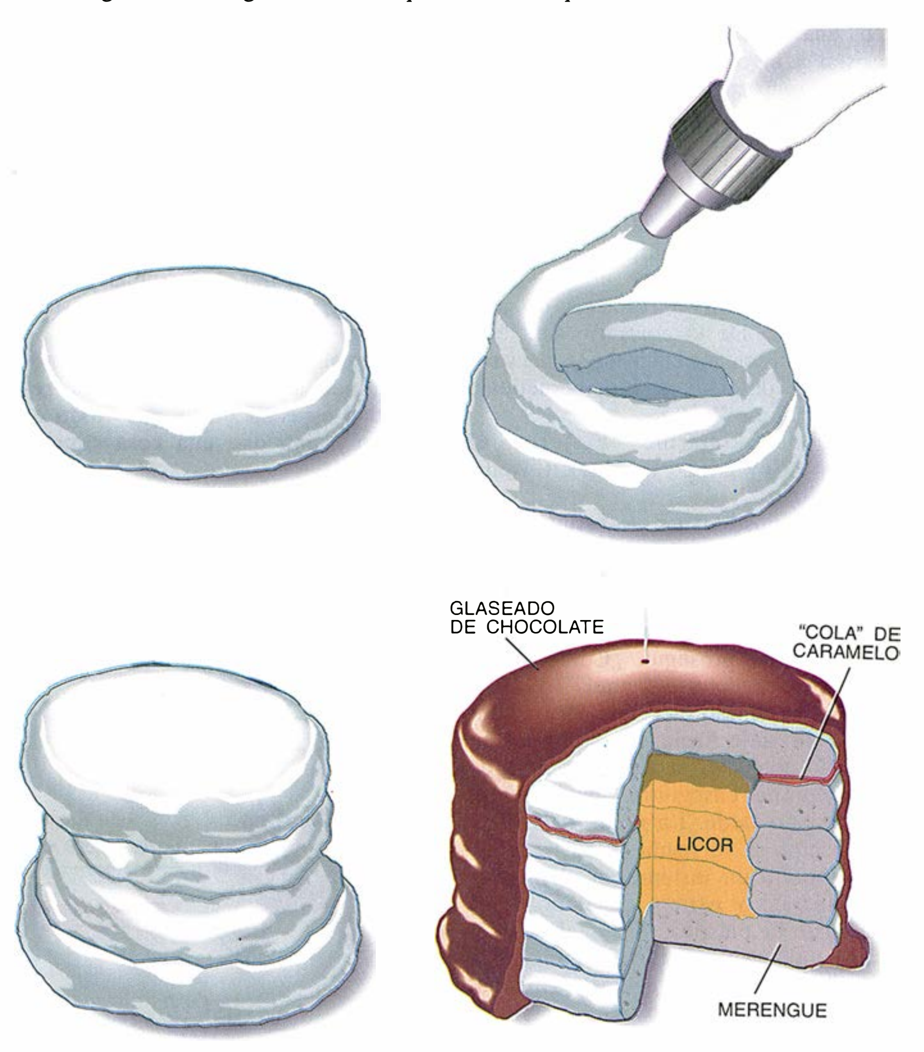
Para preparar los lados, coloque el merengue restante en una manga de las que se emplean para escarchar y adornar tartas. La boquilla debe tener un diámetro de unos 10 milímetros. Deposite en forma de espiral el merengue de la manga sobre los discos de merengue que hacen de fondos. Los lados medirán unos 40 milímetros de altura. Estas dos carcasas de vol-au-vent y las tapas hornéelas, para secarlas, a unos 120 grados durante unas dos horas.

El relleno se compone de partes iguales de mermelada, azúcar líquido y un licor de fruta, como kirsch o licor de albaricoque (lo mejor es combinarlo con la clase de mermelada que se emplee). Vierta la mezcla dentro de las envolturas hasta casi llenarlas y selle las tapas con jarabe de caramelo. (Para la confección de éste, hierva una mezcla de agua y azúcar.) Cubra con una capa de glaseado de uno o dos milímetros de grueso. El glaseado se hace con una onza y tres cuartos (50 gramos) de chocolate (preferiblemente con un 60 a 70 por ciento de cacao sólido) mezclado con aproximadamente un cucharón (10 mililitros) de mantequilla fundida y clara. No hay que dejar que la temperatura exceda de los 65 grados, porque entonces el glaseado podría formar grumos. En la tapa abra un orificio con una aguja, envuelva el dulce en papel de plástico y métalo en el congelador.

Los merengues deben dejarse congelar al menos durante 10 horas. Una vez congelados, aguantarán meses. A causa de su gran contenido alcohólico, la mezcla líquida interior no se solidificará.

Al retirar un merengue del congelador, sin perder un instante hay que retirar el plástico para que no se condense agua sobre el glaseado. Coloque entonces el merengue en el microondas regulado en alta y cueza hasta que salgan burbujas por el agujerito de la tapa (unos 30 segundos). Las burbujas le avisan que el relleno ha comenzado a hervir. Pero, he aquí el contraste, el glaseado permanece frío gracias a las buenas propiedades aislantes del merengue. Esas propiedades puede reforzarlas revistiendo de caramelo el interior del merengue. Ocurre entonces que el caramelo impide que el relleno penetre en el merengue y reduzca su capacidad aislante.

Como alternativa a la técnica del vol-au-vent descrita, puede el lector intentar vaciar el interior de un merengue cocido al horno a través de un pequeño orificio (de cinco a diez milímetros de diámetro). Rellene entonces con la mezcla de mermelada y cierre el orificio con glaseado. Con este procedimiento pueden hacerse floridas helados de tamaño bocadito. Pero antes de servirlos, advierta a sus invitados que el interior está caliente.



3. El florida helado se hace confeccionando una envoltura de merengue arrollado. Después de introducir la solución de licor de fruta, se sella con caramelo la tapa de merengue. Una vez recubierto de chocolate glaseado y congelado, el postre se calienta en un horno de microondas

Juegos matemáticos

Ian Stewart

Viajes por el tiempo (1)

Acababa de terminar mi jornada laboral en los laboratorios *Hawkrose & Penking* cuando llegó a mis oídos una débil queja. El gemido provenía de la zona de simulación de realidad virtual. ¿Se trataría de una irrupción ciberespacial? Los sistemas de seguridad, dotados de robots sensibles al ADN, se encontraban teóricamente alerta, pero el año pasado, justo el 3000, un delincuente había logrado invadir el sistema electrónico y se había infiltrado a través de la realidad virtual.

Un objeto extraño se materializó en mitad de la sala. Parecía consistir en una carcasa de metal brillante, cristal y algo similar a plástico blanco de tono amarillento. En su interior sentábase un hombre embozado en un abrigo negro. El hombre me hizo un gesto.

"¡Atención, soy de Seguridad! ¡Esta sala está sellada y clausurada! exclamé. ¡Usted! ¡Salga con las manos en alto! No toque ningún láser, fáser, lanzatorpedos o arma de ninguna clase. De lo contrario será aniquilado instantáneamente por nuestros sistemas defensivos biocibernéticos. ¡Identifíquese!"

"Puede llamarme 'Viajero del tiempo'. Soy amigo de Herbert Wells.

"Herbert..."

¿Sería posible que se estuviera refiriendo a Herbert George Wells, al célebre H. G. Wells de la ciencia-ficción?

"Supongamos por un segundo que me lo creo, proseguí. ¿Cómo y por qué ha entrado usted aquí?"

"No he tenido elección. Me encontraba de viaje hacia un futuro lejano cuando noté olor a quemado. Apagué la máquina enseguida, pero ya era demasiado tarde. La rueda del selector temporal se había roto."

Revolvió un instante en el interior del aparato y extrajo de él un disco de materia plástica, del cual se elevaba todavía un hilillo de humo. Era marfil. "Sin duda recordará usted, comenzó a balbucear para tranquilizarme, que en el número de 1894-95 de *The New Review* mi amigo Wells publicó una historia titulada *La máquina del tiempo.*"

Yo me acordaba: la historia de la literatura antigua es una de mis aficiones.

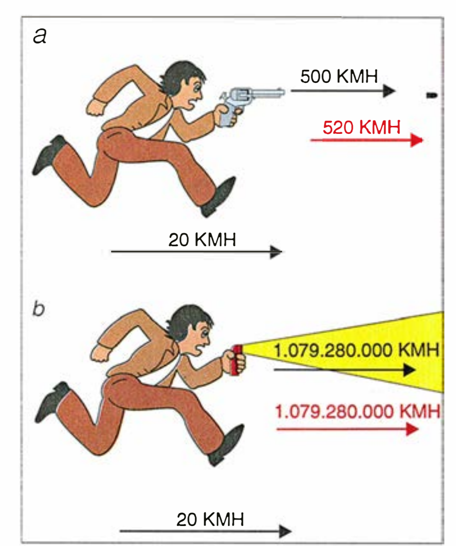
"Desde luego —añadí— en aquel momento la revista no podía determinar en qué año publicaría él esta nota."

"La historia se basaba en un invento real. El propio Wells explica la idea fundamental: 'No existe diferencia entre el Tiempo y cualquiera de las tres dimensiones del Espacio, salvo que nuestra consciencia se mueve a lo largo de él'. Esta máquina funciona en una dirección diferente de la de nuestra conciencia; eso es todo. Cuando funciona."

"Interesante, comenté. No del todo cierto, pero interesante." Le expliqué entonces los rudimentos de la relatividad, empezando por la llamada relatividad especial.

"Ante todo, es preciso tener presente que 'relatividad' es un nombre absurdo. Se utiliza por mero accidente histórico. Ahora ya es imposible de evitar. A menos que seamos capaces de reparar su máquina y logre usted regresar y convencer a Einstein para que invente uno mejor."

Le expliqué entonces que la noción fundamental de la teoría de relatividad especial no es que "todo es relativo", sino que una cosa concreta, a saber, la velocidad de la luz, es absoluta. Si vamos corriendo a 20 kilómetros por hora y disparamos un tiro hacia adelante y la bala vuela a 500 km/h respecto a nosotros, el proyectil hará impacto contra un blanco fijo a 520 kilómetros por hora, que es la suma de las dos componentes. En cambio, si encendemos una linterna que proyecta su luz hacia adelante a 1.079.280.000 kilómetros por hora, la luz no llegará a un blanco fijo a 1.079.280.020 km/h, sino a 1.079.280.000 km/h, a la misma velocidad exactamente que si estuviéramos inmóviles.



1. En la mecánica newtoniana las velocidades relativas se combinan aditivamente (a). *En mecánica relativista la velocidad de la luz es constante* (b)

"Albert Michelson y Edward Morley descubrieron este fenómeno entre 1881 y 1894. Estaban tratando de detectar el movimiento de la Tierra con respecto al 'éter', fluido hipotético omnipresente y supuesto soporte de todas las radiaciones electromagnéticas, incluida la luz. Si la física newtoniana fuese correcta, el movimiento de la Tierra habría de traducirse en una diferencia de las velocidades aparentes de la luz cuando la Tierra estuviese en dos puntos antagónicos de su órbita, en los cuales se desplazaría en sentidos opuestos. Pero no observaron ninguna diferencia en las velocidades, ni aun con instrumentos muy precisos.

"Mas, si en el éter se formasen remolinos de ese tipo serían de esperar efectos curiosos en la luz de las estrellas lejanas. Michelson y Morley concluyeron que, o bien el éter no existe, o que la Tierra permanece fija respecto al éter, lo que es casi imposible de sostener, o que la luz es una cosa bien extraña.

"Es al físico Albert Einstein a quien se le atribuye la teoría según la cual la luz se comporta de forma extraña, la teoría de la relatividad especial, como ya he dicho. Einstein publicó su teoría en 1905. De todas formas, Hendrik Lorentz y Henri Poincaré, entre otros, estaban trabajando en la misma idea, porque las ecuaciones del electromagnetismo de Maxwell eran incompatibles con la mecánica newtoniana. El problema se originaba con las 'referencias móviles'. ¿De qué forma cambian las ecuaciones cuando el observador está en movimien-

to? Hay fórmulas que responden a esta cuestión, conocidas por transformaciones de coordenadas. En la mecánica newtoniana, por ejemplo, a las velocidades medidas por (o con respecto a) un observador en movimiento se les resta la velocidad del observador. Pero las transformaciones newtonianas de coordenadas modifican las ecuaciones de Maxwell. Por otra parte, tales ecuaciones permanecen invariantes frente a otras fórmulas, llamadas transformaciones de Lorentz. En éstas, la velocidad de la luz es constante; varían en cambio el espacio, el tiempo y la masa. Cuando la velocidad se acerca a la velocidad de la luz, los objetos se contraen, el tiempo se ralentiza y la masa tiende a infinito.

"Reconozco que no resulta fácil comprender todo esto sólo con fórmulas; por ello, esta teoría apenas fue comprendida hasta 1908, año en que Hermann Minkowski propuso un modelo matemático adecuado, conocido en nuestros días por espacio-tiempo de Minkowski.

"Precisamente porque la relatividad se ocupa del comportamiento no relativo de la luz, todo en ella es fuertemente dependiente del sistema de referencia que utilice el observador. Los observatorios móviles y los fijos ven de diferentes maneras unos mismos acontecimientos."

"Mi Máquina del tiempo se funda en un principio análogo."

"Muy bien. Desde un punto de vista matemático, un sistema de referencia es un sistema de coordenadas. La física newtoniana se valía de un espacio de tres coordenadas fijas (x, y, z). En la concepción newtoniana, la estructura del espacio era independiente del tiempo y, por ello, no se acostumbraba representar al tiempo mediante una coordenada. Minkowski, por su parte, dio explícitamente al tiempo el carácter de una coordenada más. Podemos representar un espacio-tiempo de Minkowski bidimensional en un plano. El eje de abscisas x, horizontal, determina la posición de una partícula en el espacio, y el eje de ordenadas, t, su posición en el tiempo.

"En un espacio-tiempo de Minkowski 'entero' x tiene tres dimensiones, pero por sencillez, aquí supondremos que tiene sólo una. En lo sucesivo tendré que representar el espacio en forma bidimensional. El problema está en que cuatro dimensiones de espacio-tiempo se representan mal sobre una hoja de papel, que tiene dos dimensiones.

"Cuando una partícula se desplaza, describe en el espacio-tiempo una curva llamada su 'línea del mundo'. Si el vector velocidad es constante, la línea del mundo resulta ser una recta, cuya pendiente es igual a la velocidad. Las partículas que se mueven lentamente recorren poco espacio por unidad de tiempo y sus líneas del mundo son casi verticales; por el contrario, las muy rápidas recorren mucho espacio por unidad de tiempo y sus líneas del mundo son casi horizontales. A medio camino entre unas y otras, formando 45 grados, están las bisectrices, líneas del mundo de las partículas que recorren cierta cantidad de espacio en esa misma cantidad de tiempo, medidas las cantidades con unidades convenientes. Las unidades se eligen de modo que las bisectrices correspondan a la velocidad de la luz, por ejemplo, el año para el eje de tiempos y el año luz para el espacio. ¿Qué cosa recorre un año-luz de espacio en un tiempo de un año?"

"¿La luz?"

"¡Evidentemente! Por ello, las líneas de mundo situadas a 45 grados corresponden a las partículas de luz —rayos luminosos o fotones— o a cualquier otra cosa que se desplace a esa misma velocidad."

"¿Qué es una partícula de luz?"

"No vea en eso más que una metáfora. Piense sólo en rayos de luz, si lo prefiere. La relatividad prohíbe a los cuerpos moverse más rápidamente que la luz. La razón, desde el punto de vista matemático, es que sus longitudes pasarían a ser números imaginarios, en los que aparece el número i, cuyo cuadrado es -1, y otro tanto valdría para las masas y para el transcurso local del tiempo. Por ese motivo, la línea del mundo de una partícula real nunca puede apartarse más de 45 grados de la vertical. Las líneas del mundo de ese tipo reciben el calificativo de 'líneas temporales' o más técnicamente, 'cronomorfas'. Todo fenómeno o acontecimiento —un punto del espacio-tiempo— tiene asociado un 'cono de luz' limitado por las dos rectas que pasan por él y forman 45 grados con la vertical. Cuando se consideran dos dimensiones de espacio, la superficie es un cono en sentido propio. El semicono superior contiene el futuro del acontecimiento, o sea, todos los puntos del espacio-tiempo sobre los que tal suceso podría influir. El semicono inferior es su pasado, el conjunto de fenómenos que podrían ejercer influencia en él. Todo lo demás es territorio prohibido, constituido por otros lugares y otros tiempos sin relación causal posible con el acontecimiento elegido.

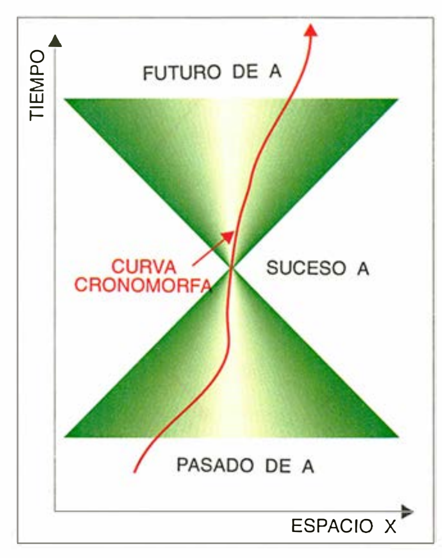
"Ahora bien, el teorema de Pitágoras estipula que, en el espacio ordinario y utilizando un sistema de referencia ortonormal, la distancia entre los puntos de coordenadas (x, y, z) y (X, Y, Z) es la raíz cuadrada de la cantidad:

$$(x-X)^2+(y-Y)^2+(z-Z)^2$$

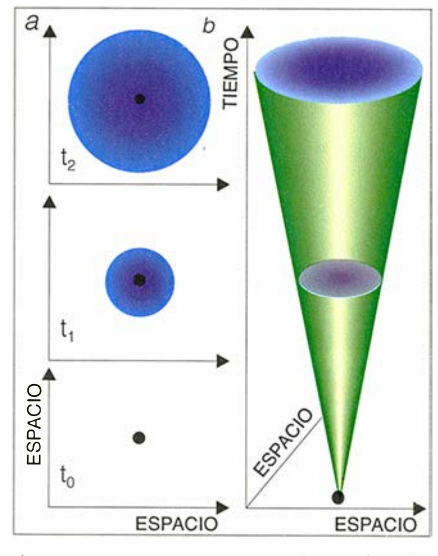
"Existe en relatividad especial una magnitud análoga, el *intervalo* entre los acontecimientos (x, t) y (X, T), dada por:

$$(x-X)^2-(t-T)^2$$

"Fijémonos en el signo negativo: el tiempo desempeña un papel especial.



2. Espacio-tiempo de Minkowski: pasado, presente, acontecimiento A, futuro y línea del mundo, que en este caso es cronomorfa



3. Representación espacial (en dos dimensiones) de la historia de la propagación de una onda (a) *y su representación en el espacio-tiempo de Minkowski* (b)

En este punto Wells se equivocaba: el tiempo es, sí, una dimensión, pero no es idéntica a las dimensiones espaciales; no obstante, hasta cierto punto, se puede combinar con ellas, como explicaré enseguida. Sea como fuere, la cuestión principal es que a lo largo de las generatrices del cono, las rectas de 45 grados, en las cuales $(x-X)^2=(t-T)^2$, el intervalo es cero. Estas rectas de 45 grados se llaman 'rectas de luz'."

"Pero, ¿qué representa la magnitud llamada 'intervalo'?"

"El intervalo está relacionado con el ritmo de transcurso del tiempo para un observador en movimiento. Cuanto más rápidamente se mueve un objeto, más lentamente le parece que transcurre el tiempo. Tal efecto se conoce por dilatación de las duraciones. Al aproximarnos a una recta de luz, también llamada 'curva nula', o sea, al viajar a velocidades más y más cercanas a la velocidad de la luz, experimentamos que el tiempo transcurre más lentamente y tiende hacia cero. Si pudiéramos viajar a la velocidad de la luz, el tiempo se detendría. En un fotón, el tiempo no transcurre."

"Según esta teoría, el tiempo resulta bastante variable, dijo pensativo."

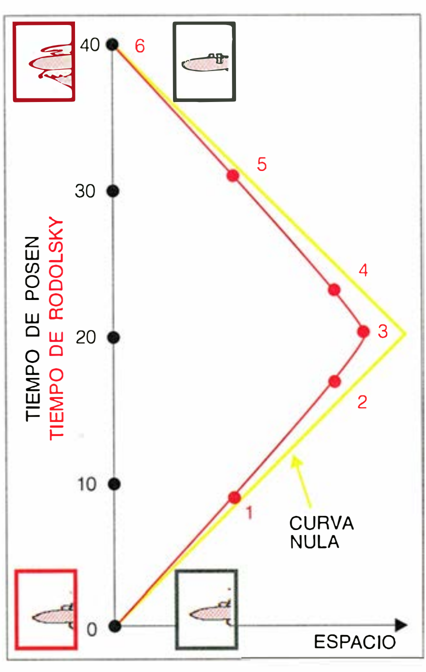
"Así es. En 1911, Paul Langevin señaló un hecho curioso de la relatividad especial, la paradoja de los gemelos. Imaginemos que nacen en la Tierra dos gemelos, Posen y Rodolsky [*figura 4*]. Posen pasa en ella toda su vida, mientras que Rodolsky viaja a velocidad próxima a la de la luz y regresa después a la Tierra a la misma velocidad. Debido a la dilatación de las duraciones, podría suceder que en el sistema de referencia de Rodolsky hubieran transcurrido sólo seis años, mientras que en el de Posen han transcurrido 40."

"Pero a buen seguro que la situación es simétrica, opuso. En la referencia de Rodolsky es Posen quien parece viajar casi a la velocidad de la luz. Entonces, por el mismo razonamiento, será Posen quien envejezca menos, lo cual es absurdo."

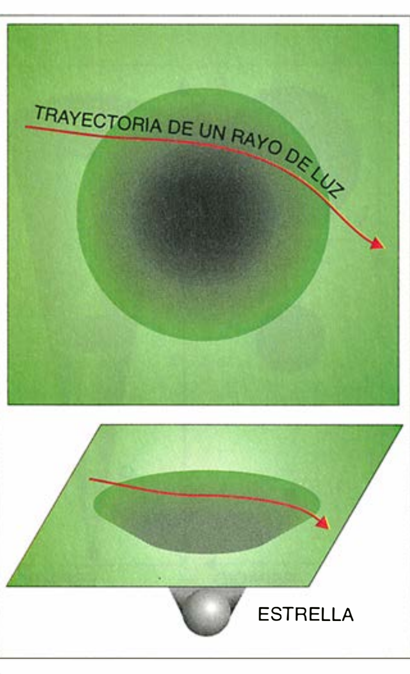
"Por eso se pensó que se trataba de una paradoja, pero no hay tal. La situación sólo es paradójica si no se examina el diagrama de espacio-tiempo. Al hacerlo caemos en la cuenta de que la elección del hermano que utiliza la referencia 'fija' no es arbitraria. El movimiento de Rodolsky entraña aceleraciones (positivas y negativas), lo que no le ocurre a Posen, lo cual destruye la aparente simetría de los dos gemelos. La aceleración no es una noción relativa en la teoría de Einstein."

"Todo eso no es más que teoría, dijo el Viajero. Sobre todo para él. La realidad es muy distinta."

"¡Que no, que no! El efecto fue comprobado a finales del siglo XX transportando relojes atómicos en aviones de reacción alrededor de la Tierra. Estos aviones son lentos comparados con la luz y la discrepancia temporal observada (y pronosticada) no es más que una ínfima fracción de segundo. Tiene que ser posible aprovechar esta fisura para crear una máquina que permita viajar por el tiempo."



4. Paradoja de los gemelos



5. Desviación de la luz por la gravedad. Trayectoria de un rayo de luz

"¡Yo la he construido ya!"

"Nosotros no utilizaremos ese chisme suyo de marfil, sino la relatividad. Y para ello tenemos antes que comprender la teoría einsteiniana de la gravitación."

"¿Qué relación puede haber entre la gravitación y los viajes por el tiempo?"

"Einstein inventó una segunda teoría, conocida por relatividad general, que es una síntesis de la gravitación newtoniana y de la relatividad especial. ¿Sabe usted lo que dijo Newton de la gravedad?"

"Claro que sí. Se trata de una fuerza que aparta a las partículas de la trayectoria perfectamente rectilínea que de no ser por ella seguirían. Es ejercida sobre todas las partículas y es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia."

"Veámoslo geométricamente. En ausencia de toda fuerza, como la gravedad, las trayectorias seguidas por las partículas son las geodésicas. Las geodésicas son las curvas de recorrido más corto, las que hacen mínima la distancia entre dos cualesquiera de sus puntos. En el espacio-tiempo llano de Minkowski, las trayectorias relativistas correspondientes hacen mínima no la distancia, sino el intervalo. El problema consiste en añadir los efectos de la gravitación. Einstein no incorpora la gravitación con el carácter de una fuerza más, sino como una distorsión de la estructura del espacio-tiempo, que modifica el valor del intervalo. Este intervalo entre acontecimientos próximos constituye la métrica del espacio-tiempo. La imagen habitual consiste en decir que el espacio-tiempo 'está curvado'."

"¿Curvado alrededor de qué?"

"Curvado alrededor de nada. Comparado con el espacio-tiempo llano, entraña una distorsión intrínseca. Podríamos, con igual derecho preguntar sobre qué está aplanado el espacio euclídeo ordinario. La pregunta sería igual de razonable e igual de absurda. Físicamente, la curvatura del espacio-tiempo se interpreta como fuerza de gravedad, que deforma el cono de luz. Una de las consecuencias es el efecto de lente gravitatoria, debido a que los rayos de luz son curvados por los objetos con masa, fenómeno que Einstein descubrió en 1911 y publicó en 1915. El efecto fue observado por vez primera con ocasión de un eclipse de sol. Se descubrió posteriormente que la luz de ciertos cuásares lejanos (los cuásares son objetos cosmológicos muy potentes y muy lejanos) queda asimismo desviada por una galaxia intermedia, produciendo imágenes múltiples en los telescopios."

La figura 5 ilustra esta idea presentando una sección "espaciomorfa" del espacio-tiempo de las cercanías de una estrella. (Una sección espaciomorfa es una "instantánea" del espacio-tiempo en un momento dado.) La sección adopta la forma de una superficie curva, con un hoyo que forma una protuberancia circular en el lugar donde reside la estrella. Esta estructura del espacio-tiempo es estática; permanece cual es en el transcurso del tiempo. La luz describe líneas geodésicas de esta superficie y es "atraída hacia abajo" dentro del hoyo, pues de esta forma se reduce la longitud de su trayecto. Las partículas que describen el espacio-tiempo a velocidades menores que la luz se comportan igual. Si miramos esta superficie desde arriba se comprueba que las trayectorias de las partículas resultan curvadas, siendo las partículas "atraídas" hacia la estrella, en concordancia con la concepción newtoniana de fuerza gravitatoria.

"Lejos de la estrella, seguí explicándole, este espacio-tiempo es parecido al de Minkowski, pues el efecto gravitatorio resulta inapreciable a gran distancia. Los espacios-tiempo que tanto se parecen al de Minkowski para distancias grandes reciben el nombre de espacios-tiempo asintóticamente planos. Recordemos la expresión: es importante para poder realizar máquinas capaces de viajar por el tiempo. Nuestro propio universo es asintóticamente plano, porque los cuerpos masivos como las estrellas son poco numerosos."

"¿Puedo, entonces, darle al espacio-tiempo la forma que yo quiera? ¡Habrá de ser increíblemente flexible!"

"No es así. Al recorrer un espacio-tiempo no es posible curvar arbitrariamente el espacio. La métrica tiene que obedecer a las ecuaciones de Einstein, que relacionan el movimiento de las partículas libres con el grado de distorsión con respecto al espacio-tiempo llano de Minkowski."

"Ya veo. Existe una conexión entre la distribución de masas en el espacio-tiempo y su propia estructura. Es como si la materia crease y modelase su espacio y su tiempo propios."

"Exactamente. Y ahora puedo explicarle cómo interpretaron los físicos del siglo XX el concepto de 'máquina del tiempo' en el marco de la relatividad general.

"Una máquina para viajar por el tiempo ha de permitir a una partícula o a un objeto volver a su propio pasado; para ello, ha de lograr que la línea del mundo de ese cuerpo se cierre sobre sí misma, formando un bucle cronomorfo cerrado, un BCC. En lugar de preguntarnos, '¿Es posible construir una máquina de exploración del tiempo?' nos preguntaremos, '¿Existen los BCC?'"

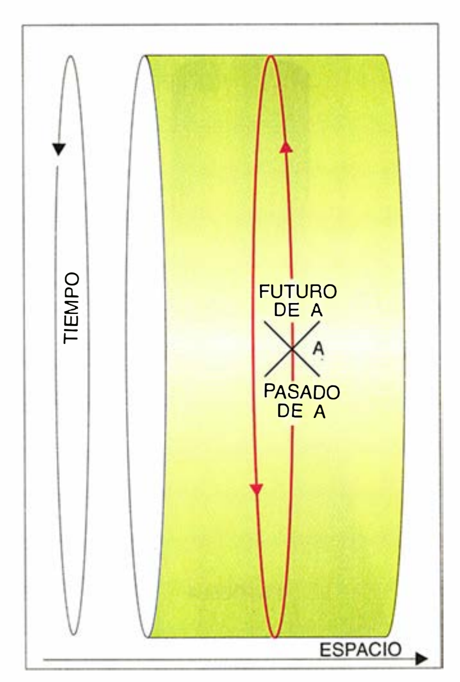
"¿Y existen?"

"Pues verá. En el espacio-tiempo llano de Minkowski, no. Los semiconos de luz trasero y delantero —el futuro y el pasado de un suceso— no se cortan jamás. Pero en espacios-tiempo de otro tipo sí pueden intersecarse. El ejemplo más sencillo se obtiene arrollando sobre sí mismo un espacio-tiempo de Minkowski para formar un cilindro [*figura 6*]. En tal caso, la coordenada temporal se vuelve cíclica."

"¿Quiere usted decir que la historia se repite?"

"En cierta forma. El espacio-tiempo se repite. ¿Queda con ello modificada la historia? Eso dependerá de lo que entendamos por 'libre albedrío', cuestión difícil que no es tratada en las ecuaciones de Einstein.

"Aunque un espacio-tiempo cilíndrico tenga aspecto curvo, desde el punto de vista gravitatorio no resulta serlo. Al enrollar una hoja de papel y darle forma cilíndrica, la hoja sigue en realidad siendo 'plana': podemos desenrollarla otra vez y el papel no queda ni plegado ni arrugado. Un ser que viviera confinado a la superficie de la hoja no se percataría de que ésta ha sido curvada, porque las distancias sobre la superficie no sufren modificación. Brevemente, la métrica, que es una propiedad local de la estructura del espacio-tiempo en la vecindad de un acontecimiento, permanece invariable. Lo que cambia es la geometría de conjunto del espacio-tiempo, su topología global.



6. Ejemplo sencillo de espacio-tiempo con un BCC

"La topología es una especie de geometría de lo flexible. Estudia las propiedades de las figuras que se conservan bajo deformaciones continuas, como la existencia de nudos o de agujeros."

"¡Ah, en mis tiempos eso se llamaba *analysis situs*! Entonces era una ciencia completamente nueva."

"Pues ahora es muy antigua y muy respetable. El arrollamiento de un espacio-tiempo de Minkowski constituye una instancia de una poderosa técnica topológica para la construcción de espacios-tiempo nuevos a partir de otros: el método de 'recorte y pegado'. Si podemos recortar pedazos de espacios-tiempo conocidos y logramos volver a pegarlos sin distorsionar sus métricas, el resultado es también un espacio-tiempo que cabe en lo posible.

"He dicho 'deformar la métrica' y no 'curvarla' porque ya hemos visto que al arrollar cilíndricamente un espacio-tiempo de Minkowski el espacio-tiempo resultante no es curvo. Me refiero a curvatura intrínseca, la que experimentaría un ser vivo que morase en su seno, no a una curvatura aparente visible desde el exterior. Una curvatura aparente de este tipo es 'inofensiva' pues en realidad no modifica la métrica. En vista de ello, la versión arrollada del espacio-tiempo de Minkowski proporciona una demostración de que en los espacios-tiempo que obedecen a las ecuaciones de Einstein pudieran existir BCC, y en consecuencia, que el viaje por el tiempo no es incompatible con las leyes físicas. Ello no entraña, sin embargo, que se pueda viajar por el tiempo."

"¡Ya veo la diferencia! Por una parte está lo matemáticamente posible, y, por otra, lo que es físicamente realizable."

"Así es. Un espacio-tiempo es matemáticamente posible si obedece a las ecuaciones de Einstein. Es físicamente posible si puede existir, o puede ser creado, y formar parte de nuestro propio universo. Por desgracia para usted, no existe razón para pensar que el espacio-tiempo de Minkowski arrollado sea físicamente posible. Sería difícil remodelar el Universo y darle esa forma en el caso de que no estuviera ya provisto de un tiempo cíclico. La búsqueda de espacios-tiempo que posean BCC y sean físicamente plausibles constituye una indagación más verosímil. Existe una multitud de topologías matemáticamente posibles, pero no está permitido acceder a todas desde el lugar en que nos encontramos.

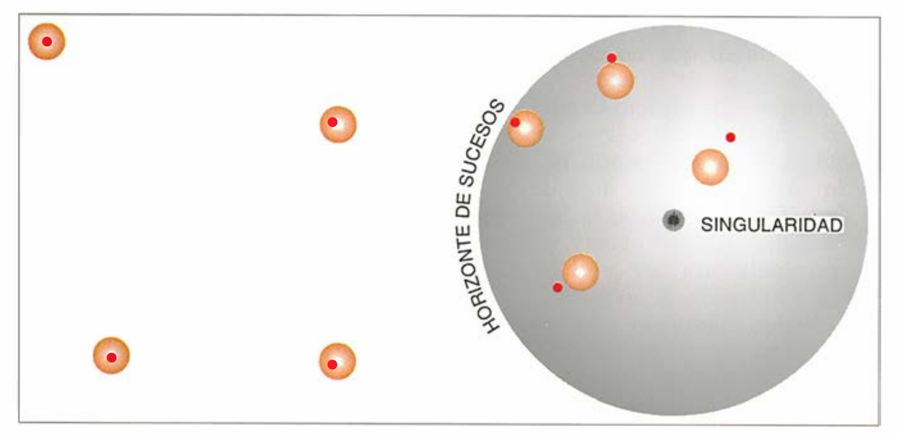
"Sí podemos, empero, comprender algunas de interés notable. En la mecánica newtoniana clásica no hay límite para la velocidad de los objetos móviles. Las partículas pueden escapar de la atracción de una masa cualquiera, por grande que sea la intensidad de su campo gravitatorio, con tal de alcanzar una velocidad superior a la de escape que corresponda. En un artículo presentado a la Regia Sociedad en 1783, John Michell hizo notar que tal idea, en conjunción con la de que la luz tiene una velocidad finita, implica que los objetos de masa suficientemente grande no pueden emitir luz: basta que la velocidad de la luz sea menor que la correspondiente velocidad de escape. Pierre Simon de Laplace hizo esta misma observación en su *Exposition du système du Monde.* Ambos sabios imaginaron que el Universo podría estar sembrado de cuerpos enormes, mayores que las estrellas, pero completamente oscuros.

"En 1915, Karl Schwarzschild logró nuevos progresos en esta cuestión, ya en el contexto de la relatividad general, al resolver las ecuaciones de Einstein para el campo gravitatorio en el espacio vacío circundante a una estrella de gran masa. Su solución se comportaba de forma muy extraña a una distancia crítica del centro de la esfera, el llamado radio de Schwarzschild, igual a $2GM/c^2$, donde G es la constante universal de gravitación, M la masa de la esfera y c la velocidad de la luz. Cuando fue descubierto se consideró que su significación matemática era que en la solución de Schwarzschild el espacio y el tiempo perdían su respectiva identidad y quedaban desprovistos de sentido. No obstante, el radio de Schwarzschild es de dos kilómetros en el caso del Sol y de un centímetro para la Tierra. ¿Qué ocurriría si una estrella fuese de tan gran densidad que su radio fuese inferior al radio de Schwarzschild?

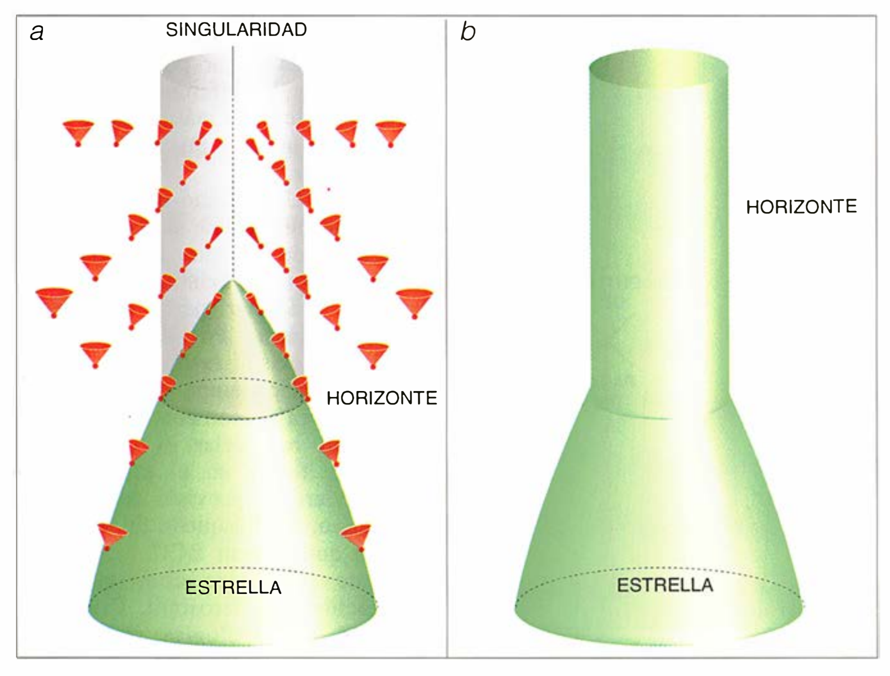
"En 1939, Robert Oppenheimer y Hartland Snyder demostraron que tal estrella se 'desplomaría sobre sí misma', se colapsaría a efectos de su propia atracción gravitatoria. De hecho, sería toda una porción del espacio-tiempo la que se colapsaría, formando una región de la que ni la materia ni la misma luz podrían escapar. Nacía así un nuevo y apasionante concepto físico. En 1967, John Archibald Wheeler ideó el término 'agujero negro'.

"La creación de un agujero negro estático —un agujero no rotatorio— se ilustra en la figura 8, en la cual el espacio está representado en dos dimensiones y el tiempo se lee verticalmente de abajo arriba. Una distribución inicial de materia con simetría esférica se contrae hasta el radio de Schwarzschild, y continúa después contrayéndose hasta que, transcurrido un tiempo finito, toda la masa se ha condensado en un solo punto, la singularidad. Desde el exterior, lo único detectable es el horizonte de sucesos, situado en el radio de Schwarzschild, que separa la región de la cual puede escapar la luz de la otra que jamás será observables desde el exterior. En el interior del horizonte de sucesos se oculta el agujero negro.

"La figura 8*a* representa la secuencia de acontecimientos que vería un hipotético observador situado en la superficie de la estrella; la coordenada de tiempo *t*, indica el tiempo experimentado por tal observador. Si observásemos desde el exterior el desplome de la estrella, la veríamos contraerse hacia su radio de Schwarzschild, pero nunca veríamos cómo lo alcanza. Mientras se contrae, su velocidad de contracción, vista desde el exterior, se aproxima a la velocidad de la luz y la dilatación relativista de las duraciones implica que el desplome durará un tiempo infinito cuando es visto por un observador, como en la figura 8*b*. Sí observaríamos, empero, que la luz emitida por la estrella experimenta un corrimiento hacia el extremo rojo del espectro. En el interior del agujero negro, los papeles del tiempo y el espacio se intercambian. De igual forma que el tiempo crece inexorablemente en el espacio



7. El horizonte de sucesos constituye la frontera de un agujero negro. La señal emitida por una fuente (punto rojo) *ha sido representada en un instante dado para distintas posiciones de las fuentes*

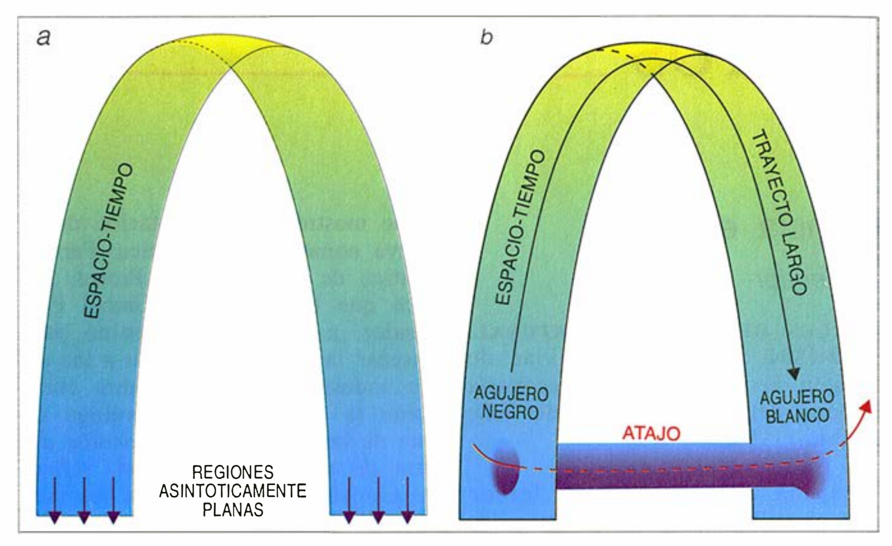


8. La formación de un agujero negro vista por un observador situado en la superficie de la masa que se desploma (a) *y por un observador exterior* (b)

exterior, el espacio decrece inexorablemente en el interior de un agujero negro.

"Aquí es donde se abre un campo para la industria, expliqué. *Hawkrose & Penking* ha desarrollado toda una batería de técnicas, que van desde la ampliación de la espuma cuántica hasta el cálculo de improbabilidades. Como la topología del espacio-tiempo de un agujero negro es asintóticamente plana (a grandes distancias, es la de Minkowski) es posible recortarlo y pegarlo a todo universo cuyo espacio-tiempo posea regiones asintóticamente planas de cierto tamaño. Por ello, la topología de los agujeros negros es físicamente posible en nuestro Universo. A decir verdad, el supuesto de un colapso gravitatorio la torna más plausible todavía: basta partir de una concentración importante de materia, como la de una estrella de neutrones.

"Sin embargo, un agujero negro estático (esto es, no giratorio) carece de bucles cronomorfos cerrados. La etapa siguiente consiste en observar que en las ecuaciones de Einstein el tiempo es reversible: a cada solución le corresponde otra, idéntica a la anterior excepto por la inversión del sentido del tiempo. El inverso temporal de una agujero negro es un agujero blanco, que se asemeja al de la figura 8 vuelto del revés. Un horizonte de sucesos 'ordinario' constituye una barrera de la que ninguna partícula puede escapar; el inverso temporal de un horizonte es una frontera en la que no puede caer partícula alguna, aunque desde ella sí pueden ser emitidas partículas de vez en cuando. Así, visto desde el exterior, un agujero blanco parece ser la súbita explosión de una cantidad de materia próxima a la de una estrella, procedente del inverso temporal de un horizonte de sucesos."



10. Podemos crear puentes en un espacio-tiempo provisto de zonas asintóticamente planas (a) mediante "collages" (b) utilizables como transmisores de materia. Tal pasarela puede ser corta, a pesar de que sus extremidades se encuentren muy alejadas en el espacio-tiempo inicial, porque la distancia en el puente es intrínseca

"Pero, ¿por qué habría la singularidad acechante en un agujero blanco de vomitar bruscamente una estrella, tras haber permanecido invariable desde el alba de los tiempos?" protestó.

"Parece razonable que una concentración inicial de materia, si es lo bastante densa, pueda colapsarse y llegar a formar un agujero negro; la situación inversa parece infringir la causalidad. No es así, desde luego, pero la causa reside fuera de nuestro propio Universo, por lo que no vemos llegar el resultado. Admitamos, por el momento, que los agujeros blancos son una posibilidad matemática, y señalemos que también ellos son asintóticamente planos. Por tanto, si supiéramos construir uno, podríamos 'pegarlo' correctamente a nuestro propio Universo. *Hawkrose & Penking* acaba de poner a punto un método para conseguirlo, que se fundamenta en el principio de incertidumbre. Utilizamos un amplificador de Heisenberg para lograr que la posición de la materia sea tan indeterminada que pudiera ser completamente exterior al Universo normal.

"Y más todavía: podemos pegar un agujero negro a un agujero blanco. Los cortamos a lo largo de sus horizontes de sucesos gracias a un cosmótomo y cosemos los bordes con materia oscura fría. El resultado (o más precisamente, una sección fija de tipo espaciomorfo) está representado en la figura 10: es una especie de tubo. La materia sólo puede recorrerlo en un sentido, a saber, entrando por el agujero negro y saliendo por el blanco; una especie de válvula para materia. El paso a través de esta válvula se realiza siguiendo una curva cronomorfa, pues, de hecho, las partículas materiales podrían pasar a su través.

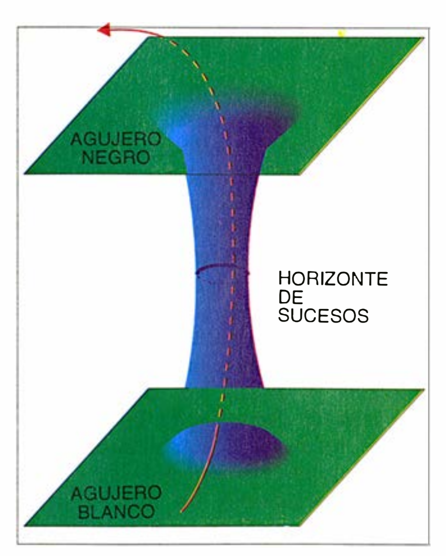
"Como la topología de la figura 8 es asintóticamente plana en los dos bordes del tubo, estas dos extremidades pueden ser pegadas a toda región asintóticamente plana de un espacio-tiempo cualquiera. Podríamos pegar uno de los extremos a nuestro Universo y, el otro, a otro universo cualquiera. Y también podríamos pegar ambos extremos al nuestro, allí donde quisiéramos (salvo en la cercanía de una concentración de materia). Tendríamos entonces un puente espacio-temporal, un 'agujero de gusano'. *Hawkrose & Penking* fabrica los mejores puentes del mundo, me ufané. Les llamamos puentes porque permiten el paso de un punto del Universo a otro punto del mismo o de otro Universo. Lo que pasa es que ahora el río es alguna clase de espacio-tiempo. Es preciso recordar que la distancia para franquear el puente es muy corta, mientras que la existente entre las dos aberturas, que permanecen en el espacio-tiempo inicial, puede ser todo lo grande que se quiera."

"Ya comprendo. Un puente es un atajo en el Universo."

"Exacto. Pero se trata de una transmisión de materia, no de un viaje en el tiempo."

"Pero, ¿tiene alguna relación con viajes de ese otro tipo?", preguntó.

"Bueno, ya veremos. Pero ésa es otra historia..."



9. Puente espacio-temporal

Libros

Luis Alonso y David Jou

Ciencia española

Esplendor

ANALES DE HISTORIA NATURAL. 1799-1804. Estudio preliminar de Joaquín Fernández Pérez. Secretaría General del Plan Nacional de I+D; Madrid, 1993.

España vivió décadas de fervor científico durante los reinados de Carlos III y Carlos IV. Hubo planes de renovación académica, de creación de instituciones, de fomento de todas las disciplinas, de contratación de expertos extranjeros, de envío de jóvenes capacitados a diversos centros de Europa. Aunque de manera principal el impulso venía de la corona, el afán de ilustración lo inculcaron en medida no desdeñable asociaciones y particulares.

Exponente de esa atmósfera, y fruto maduro de una simiente echada veinte años atrás, con la tierra roturada otros veinte antes, fueron los *Anales de Historia Natural*, comenzados a publicar en octubre de 1799, transformados en *Anales de Ciencias Naturales* desde 1801 para volver a la denominación de partida con el último número, el 21, en 1804.

Era una revista ágil y sólida, a la vez. Como las que manejaron en París Antonio Joseph Cavanilles, Luis Proust y Domingo (García) Fernández, o en Friburgo Christiano Herrgen, los cuatro encargados por el rey para "la redacción de esta importante obra". La elección del monarca no pudo ser más afortunada. Cavanilles, auténtica alma de la publicación, se había convertido en el español mejor considerado en la Europa linneana desde su primer estudio sobre las malváceas. Había tejido, además, una sutil red de relaciones continentales que le facilitaba todo tipo de novedades y fuentes de información, de obvia importancia para dirigir una revista. Herrgen, discípulo de Werner, fue "el *primero* que trasplantó algunos ramos de la verdadera Mineralogía al suelo español."

Proust había demostrado en la Academia de Artillería de Segovia su dominio del laboratorio aplicado a las necesidades del arma y dejado traslucir su capacidad teorética en los escarceos sobre la ley de las proporciones definidas. Más vacilante se mostró en la aceptación de la nueva nomenclatura química. Farmacéutico de origen, como Proust, parece que fue Domingo García Fernández, a quien se le destinó para enseñar la química aplicada a las artes industriales. Tradujo dos obras sobre la materia, en el prólogo de una de las cuales (los *Elementos del arte de teñir*, de Berthollet) refleja la atmósfera que respiraban los fundadores y las bases que se estaban poniendo en el país: "si España sabe aprovecharse de su doctrina (la expuesta por Berthollet), le importará mucho más la adquisición de este libro que la conquista de una provincia, porque es incalculable el partido que se puede sacar de nuestras producciones naturales, el aumento que debe tomar nuestro Comercio activo, y la precisa decadencia del de otras naciones, que en el día nos dan la ley en esta parte; singularmente quando nos hallamos en estado de utilizarnos de los adelantamientos que se hagan en Europa, mediante los conocimientos que las Cátedras de Chimica de Vergara, Madrid, Segovia y Valencia empiezan a propagar en el Reyno para vivificar la industria, que tanto tiempo ha yace entorpecida por la falta de principios que reyna en nuestras fábricas."

Algún día debiera acometerse el estudio de ese momento singular de la historia de la ciencia española, aprovechando retazos de algunos trabajos parciales, de química sobre todo. Pero no puede considerarse tal el mariposeo por cuestiones secundarias o la sustitución de la interpretación y contextualización por el apresurado resumen de lo expuesto en el artículo aludido. Las páginas que se han pegado a esta reedición de los *Anales* son eso, un pegote que la revista no merecía. Hay, además, excesivas erratas, repeticiones innecesarias y falta de criterio en la transcripción (Freiberg alterna con Freyberg, con la misma aleatoriedad que Loxa con Loja y Clavijo y Fajardo con Clavijo y Faxardo, aunque este último lo borda en la página 127, cuando se desdobla en dos personajes). Demos por enésimo desliz tipográfico que Chavaneau llegue a Vergara después de haber conseguido allí hacer maleable la platina. ¿Podemos decir que Cavanilles es coetáneo de los Delhúyar en París? En las fechas se hace un auténtico lío: "Cristiano Herrgen (?-1816)" se lee en la página 21; en la 35: "Sabemos que nació en Maguncia en 1760". Un vistazo al artículo "The New Chemistry in Spain", que se cita, podría haber ayudado a despejar las dudas sobre el año del nacimiento y de la muerte de Domingo García. No es cierto que Martín de Párraga extractara la carta que Humboldt le escribe a Delambre: la traduce entera. Etcétera. (L. A.)

Metodología

Conceptos y teorías

COMMON SENSE, SCIENCE AND SCEPTICISM, por Alan Musgrave. Cambridge University Press; Cambridge, 1993.

INFERENCE, EXPLANATION, AND OTHER FRUSTRATIONS. Dirigido por John Earman. University of California Press; Berkeley, 1992.

LA COMPARABILITÉ DES THÉORIES SCIENTIFIQUES. Dirigido por Evandro Agazzi. Editions Universitaires; Friburgo, 1990.

DEFINING SCIENCE. WILLIAM WHEWELL, NATURAL KNOWLEDGE, AND PUBLIC DEBATE IN EARLY VICTORIAN BRITAIN, por Richard Yeo. Cambridge University Press; Cambridge, 1993.

PHILOSOPHY OF PHYSICS, por Lawrence Sklar. Westview Press; Boulder, 1992.

Damos por supuesto, con razón, que podemos alcanzar un conocimiento científico de las cosas y aprovecharlo para domeñarlas de acuerdo con nuestros intereses. Ahí está, a modo de prueba irrefutable, el desarrollo técnico de la humanidad. Pero los supuestos hay que fundamentarlos. De la fundamentación del conocimiento científico, es decir, de las hipótesis y teorías en cuanto tales, se ocupa la filosofía de la ciencia.

Pero existe una etapa anterior, la del conocimiento en puridad, cualquier conocimiento, no sólo el sistemático o científico. ¿Podemos, se pregunta el filósofo, conocer las cosas? La cuestión no es baladí, aun-

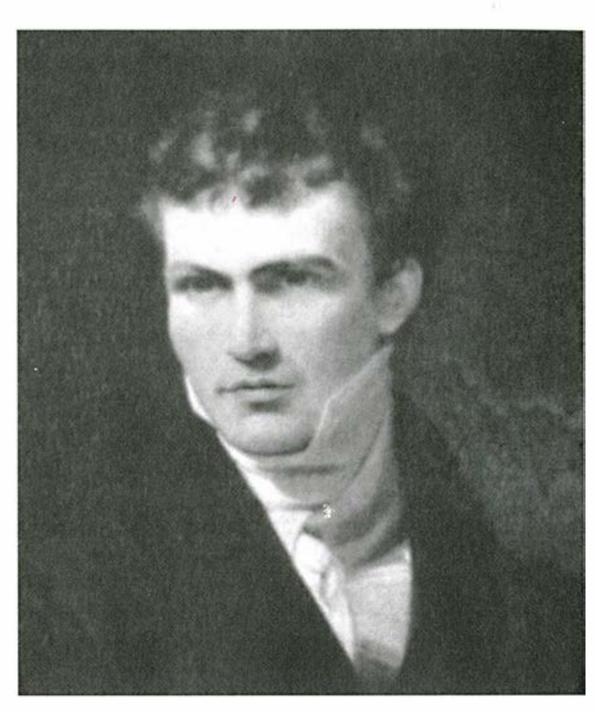
que tenga un aire de entretenimiento de mentes ociosas. Sobre ella bascula una disciplina, la epistemología, que, con la ética, parece devolver a la filosofía un pulso que había perdido en los últimos decenios. En ese contexto, Alan Musgrave ha escrito un pedagógico manual introductorio (*Common sense, science and scepticism. A historical introduction to the theory of knowledge*); y lo ha hecho a la manera en que suelen operar los filósofos: reconstruyendo la historia de términos y escuelas y aportando su propia teoría, en este caso lo que él denomina falibilismo. Musgrave es discípulo de Popper.

Para que la sentencia "*A* conoce que *P*" sea correcta, deben concurrir las tres condiciones siguientes: 1) *A* piense que *P*, 2) *P* sea verdadero y 3) *A* pueda justificar su pensamiento de que *P*. Ese parecer verdadero y justificado permite distinguir el conocimiento genuino de la mera opinión. La justificación se toma aquí por sinónimo de prueba o demostración concluyente, esto es, lo que los griegos denominaban *episteme* (de donde el nombre de epistemología a la teoría del conocimiento), contrapuesto a la simple *doxa*, o mero parecer.

Pero, ¿existen pruebas determinantes que nos faculten para afirmar que tenemos conocimiento cierto de algo? La mayoría de los filósofos se decantan por el sí, en tanto que unos pocos, los escépticos, se apuntan al no. Basan éstos su rechazo en la inviabilidad de la tercera condición: hay que justificar el fundamento de la justificación esgrimida, y el fundamento del fundamento de la justificación, y así en una regresión infinita. Los partidarios del sí niegan la necesidad de esa regresión amparándose en nociones y verdades autoevidentes (los racionalistas) o en los datos de la experiencia directa (los empiristas).

Muchas veces, exponen los escépticos, caemos en ilusiones (el remo que se dobla en el agua, la ilusión de Mueller), alucinaciones o ensoñaciones que nos dicen hasta qué punto nos engañan los sentidos. Y prosiguen, ¿por qué no nos pueden engañar siempre? ¿Cuándo sabemos que un dato es real y otro falso espejismo? La respuesta es obvia: la ciencia viene en nuestro auxilio y nos aclara que la ilusión del remo que se dobla obedece al paso de los rayos por distinto medio.

Lo mismo el empirismo que el racionalismo se proponen, no sólo establecer la fuente del conocimiento, sino también idear un método para avanzar con seguridad en su desarrollo. Francis Bacon (1561-1626) escribió con ese propósito el *Novum Organum*, nuevo con respecto al *Organon* o método del conocimiento aristotélico. Propone recoger todos los datos de una cuestión o problema, sin criterio selectivo determinado de antemano; el proceso de inducción iría eliminando los errores y prejuicios falsos. John Locke, otro empirista conspicuo, se opondría a la aceptación de todo conocimiento transmitido (libros o principios establecidos) y defendía su criba en el cedazo de la experiencia propia. Partiendo de los químicos de su tiempo, Locke distinguía entre cualidades primarias de las cosas (forma, tamaño, peso, número) y cualidades secundarias (color, sabor, textura, calor), reducibles éstas a aquéllas. En la discusión de la realidad objetiva de las cualidades secundarias basa George Berkeley su adscripción al empirismo, que le llevará paradójicamente a negar la existencia de la materia, que sintetiza en una frase archiconocida: "esse est percipi". David Hume aboga por una suerte de solipsismo: sólo podemos tener certeza de nuestras propias impresiones y probabilidad de que se cumpla el curso regular de la naturaleza.



William Whewell (1794-1866) abordó de manera sistemática la filosofía de la ciencia

Otra corriente filosófica, antagónica del escepticismo y del empirismo, por distintos motivos, es el racionalismo. Opone éste a la regresión infinita que esgrime el escéptico radical la existencia de una inteligencia capaz de tener un conocimiento cierto e inmediato del mundo que nos rodea. Pero, a diferencia de los empiristas, ese conocimiento no se apoya en los datos de los sentidos sino en principios evidentes por sí mismos. Capitalizan esta tendencia Descartes y Kant. Su modelo es el conocimiento matemático en general y la geometría de Euclides en particular. Cuando nacieron, en el siglo pasado, las geometrías no eucledianas, se cuarteó el racionalismo. Hubo intentos de establecer puentes entre distintas tendencias, como el empirismo lógico, cuyas últimas derivaciones llegan a nuestros días, o el falibilismo, que profesa el autor. De acuerdo con éste, ante el problema de la certeza de nuestro conocimiento sólo podemos defender un moderado escepticismo, que admite la verosimilitud de un enunciado mientras no existan pruebas sólidas en contra. Su tesis incorpora postulados del realismo (confianza en la percepción de los sentidos) y del racionalismo falsacionista (sólo podemos aportar contraejemplos, nunca verificaciones genuinas).

De la reflexión sobre el conocimiento articulado en conceptos, hipótesis y teorías científicas se ocupa la filosofía de la ciencia, una disciplina que ha alcanzado un extraordinario grado de desarrollo. Lo cual no significa, ni de lejos, que esté asentada y vertebrada, como se desprende de los trabajos recogidos en *Inference, Explanation, and Other Frustrations. Essays in the Philosophy of Science*, libro dividido en dos partes principales, una dedicada la inferencia y el método, la otra a las teorías y la explicación.

Aunque su objeto es analizar los fundamentos de la ciencia actual, los filósofos suelen partir de interpretaciones de textos clásicos. Así, para abordar el problema de la inducción, tienden a lucubrar sobre la *epagogé* de Aristóteles, la inferencia de Galileo, el *experimentum crucis* de Newton y la relación de causalidad en Hume. Pero no se detienen en la historia, sino que intentan justificar sus tesis con el quehacer de la ciencia actual, casi siempre la relatividad o la mecánica cuántica. Es raro que aporten ejemplos de generalización creciente (o, como estudia aquí Jaakko Hintikka, de reconciliación de diferentes generalizaciones parciales) to-

mados de la biología o la geología. En la óptica de Newton, tamizada por la teoría de los colores de Goethe, descansa la idea defendida por Nancy Cartwright según la cual no podemos dejar de lado la naturaleza de los objetos y los procesos, la ontología, a la hora de interpretar las leyes. "Las leyes fundamentales no tratan de lo que las cosas hacen sino de lo que está en su naturaleza hacer."

La aceptación de una ontología se aparta de los postulados centrales del positivismo lógico, cuya vindicación preocupa a Michael Friedman. Ese movimiento (conocido también por Círculo de Viena al que pertenecían M. Schlick, H. Reichenbach, O. Neurath y R. Carnap entre otros aglutinados en torno a la revista *Erkenntnis*) perdió prestigio tras sucesivos asaltos contra su tesis central de la existencia de un conocimiento objetivo y dotado de significado basado exclusivamente en la matemática. Friedman se esfuerza por atemperar los contraejemplos relativizadores de esas tesis aportadas por la historia y la sociología de la ciencia, al tiempo que quita hierro al empirismo ingenuo de los positivistas argumentando que también la mayoría de ellos estaba de acuerdo en que no había observaciones desnudas de carga teórica.

En una muestra del dinamismo que reina en el campo, Noam Chomsky se enfrenta a Quine y Putnam en defensa de su teoría sobre el enfoque que debe dominar a la hora de abordar el lenguaje, que, en su opinión, es el mismo que el de las ciencias empíricas. Conocida es su tesis innatista: el niño presenta una facultad de lenguaje que incorpora estructuras generales, incluidos principios fonéticos y semánticos, y su desarrollo de maduración consiste en un procedimiento generativo que asocia descripciones estructurales a expresiones e interactúa con sistemas perceptivos y cognitivos para producir interpretaciones semánticas y fonéticas. Menos sabido es el análogo biológico en que últimamente descansa, el sistema inmunitario: el cuerpo no puede fabricar anticuerpos específicos contra un antígeno a menos que no disponga ya de anticuerpos de esa especificidad.

Antes de introducirse en la segunda parte del libro, convendría repasar las primeras colaboraciones de *La comparabilité des théories scientifiques*, volumen preparado por Evandro Agazzi. Abandona éste la definición empirista de teoría (conjunto de proposiciones vinculadas entre sí por reglas lógicas, que limita la explicación a una deducción formal) para incorporar la referencia obligada a la experimentación. No hay teoría sin experimentos que la refuercen o rechacen, al tiempo que éstos son fuente de formación de conceptos.

En los experimentos cruciales pone también el positivista, a través de Marian Przeelecki, el crisol que permite discriminar entre dos teorías competidoras. La comparación y el problema anejo de la mensurabilidad o inconmensurabilidad de las teorías es el tema central de la obra, que se pormenoriza en distintos dominios. Aunque la historia ofrece numerosos ejemplos, se suele descansar siempre sobre el cotejo entre mecánica clásica y mecánica cuántica, aquélla determinista, probabilista ésta. El corazón del problema, para el filósofo de la ciencia, yace en la equiparación o no de los conceptos y los términos. No todos aceptan que los términos tengan un significado absoluto, sino que deben entenderse en un contexto, es decir, en el marco de una teoría. Y la comparación no sería tal, sino sustitución de una teoría por otra cuyo contenido ha ido evolucionando.

En la conformación de una epistemología que vertebre todas esas cuestiones se distinguen hoy, y volvemos a la segunda parte del libro precedente, tres tendencias: neoempirismo, constructivismo social y realismo. Afirman constructivistas y realistas, negándolo neoempiristas, que el producto característico de una eficaz investigación científica incorpora el conocimiento de fenómenos inobservables por los sentidos. Sostienen los realistas, pero no los constructivistas, que los fenómenos estudiados por los científicos tienen existencia extramental con propiedades al margen de los modelos o hipótesis que sobre tales fenómenos presentemos. Como es de suponer, la comparación entre teorías científicas tiene también su réplica en la comparación entre distintos enfoques epistemológicos.

Aunque no es condición suficiente, sí parece necesario que el filósofo de la ciencia se mueva con soltura en algún ámbito científico. Tal fue el caso del que se considera el primer escritor sistemático en historia y filosofía de la ciencia, biografiado por Richard Yeo en *Defining science. William Whewell, natural knowledge, and public debate in early Victorian Britain.*

Más que un retrato al uso, Yeo apunta en escorzo los perfiles sociales que alumbraron un debate en ágora abierta sobre la naturaleza de la ciencia. Las tertulias, las cartas y los periódicos aventaron las teorías ópticas de Fresnel y Young, las mediciones de la gravedad en oquedades o las hipótesis sobre la regularidad de los procesos geológicos. En las revistas generales se discutía el supuesto carácter científico de la teoría económica de David Ricardo y el rango que merecían la botánica o la química en la jerarquía de las ciencias.

William Whewell (1794-1866) estaba, unas veces detrás, otras en primera línea de esa inquietud. Concedía a las palabras, herramienta de toda argumentación axiomática, el valor preciso que recibieran de la inducción. La nueva nomenclatura química de Lavoisier, defendía, no hizo progresar ese campo, sino que llegó a ella tras analizar los resultados del alambique. Vale para él la misma atribución, cuando acuñó los términos de geología dinámica, ánodo, cátodo y otros. Puso sobre el tapete, extraídas de ejemplos de la historia, las relaciones entre teoría y observación ("hay una pátina de teoría sobre el rostro de la naturaleza"), la importancia del método por encima del resultado, la búsqueda de leyes por toda ciencia que se precie.

Whewell mismo, cuando escribía sobre mineralogía, electricidad y magnetismo, mecánica, o sobre las mareas, quizá su mayor aportación original, no se limitaba a exponer los avances últimos, sino que los enmarcaba en un continuo histórico, dentro de un modelo de progreso general de la ciencia, liberándolos del carácter particular del dominio concreto en que se registraran.

Para hacernos una idea de cómo se aplica la filosofía de la ciencia a una disciplina particular, a la física, podemos entregarnos a la lectura de *Philosophy of Physics*, de Lawrence Sklar. Lo habitual en esta rama suele ser ceñirse a la filosofía de las teorías físicas y detenerse en su formalización. Formalizar una teoría es transformarla de suerte tal que sea precisa y controlable desde el punto de vista lingüístico y deductivo; para ello hay que describir sin ambigüedad el lenguaje de la teoría (conjunto de símbolos y conjunto de expresiones), el sistema de hipótesis iniciales o axiomas y las reglas lógicas que permitan demostrar, a partir de los axiomas, los teoremas de la teoría en cuestión.

Sklar ha optado por una vía más inmediata. Se adentra en capítulos centrales de la física contemporánea (espacio-tiempo, gravedad, geometrización del mundo, mecánica estadística, irreversibilidad y descripción cuántica del mundo) para intentar acotar los fundamentos filosóficos de los conceptos y de las teorías. Abundan, como es de esperar, más los interrogantes que las respuestas.

Aunque facilita la lucubración personal al trazar las posibles soluciones en una perspectiva histórica.

En el apartado sobre la visión mecanocuántica del mundo, por ejemplo, desmenuza el experimento básico: el patrón de interferencia del paso de la luz a través de una pantalla de doble rendija y su doble confirmación de la teoría ondulatoria y corpuscular. Retrotrae al lector a los orígenes en Newton (la luz como chorro de partículas) y Huyghens (la luz como movimiento ondulatorio), lo conduce por las ideas sobre el éter y el electromagnetismo y lo sumerge, por fin, en la interpretación de Copenhague con un apretado discurso final sobre las variables escondidas. La naturaleza, o los sistemas, que emergen tiene poco que ver con el mundo observacional de la física clásica que, no obstante, le suministra no poco armamentario conceptual. Difícilmente el filósofo de la ciencia delimitará el campo semántico de las nociones de causa y simultaneidad, entre muchas, si no conoce a qué correlaciones de fenómenos alude el físico subatómico. (L. A.)



Aorta

Biomecánica

Sistemas de circulación

VITAL CIRCUITS. ON PUMPS, PIPES AND THE WORKINGS OF CIRCULATORY SYSTEMS, por Steven Vogel. Oxford University Press; Oxford, 1992.

En el prólogo, el autor comenta los motivos que le han llevado a escribir un libro sobre la circulación de los fluidos corporales, en particular sobre el sistema cardiovascular y el sistema respiratorio. Argumenta Vogel que la mayor justificación estriba en que puede fundarse en experiencias cotidianas cuya comprensión no requiere mucho más esfuerzo que la observación de lo que ocurre en nuestro entorno inmediato. El argumento sirve no sólo para enmarcar este trabajo, sino también otros suyos: *Life in moving fluids* y *Life's devices*, igualmente recomendables.

Nuestra vida se desarrolla en medios fluidos: vivimos en el aire, un gran porcentaje de nuestro cuerpo es agua, el mecanismo de transporte de alimentos y de calor en el cuerpo de los animales superiores se basa en fluidos. Sin embargo, la formación que recibimos durante nuestra educación incorpora sólo unas nociones muy elementales sobre las características y la fenomenología de los medios fluidos.

En *Life in moving fluids* Vogel abordó la descripción del movimiento de los seres vivos en los fluidos; en *Vital Circuits* se enfrenta con la descripción de los fenómenos inherentes a la vida, como son los relacionados con la circulación de los fluidos corporales. En éste reitera su propósito de contextualizar adecuadamente, desde el punto de vista de la fisiología animal y de la mecánica de fluidos, los aspectos de la circulación de los fluidos corporales que en el ser humano han sido mejor resueltos que en otras especies y aquellos aspectos en que la solución humana no es la mejor, ni probablemente la más evolucionada.

El libro aporta ejemplos deliciosos y originales. Es muy ilustrativa la utilización del número de Reynolds (parámetro adimensional básico para el análisis del movimiento de los fluidos), como indicador de la eficacia de los procesos de mezcla de la sangre; lo es, a su vez, la manera en que lo relaciona con la forma y la constitución del corazón. También es notable la explicación del tamaño de algunos elementos importantes para la circulación en distintos animales, como son los glóbulos rojos, la viscosidad de la sangre, la concentración de hemoglobina, etc. Acertado, asimismo, el examen de los diferentes tipos de bombeo de los fluidos, lo mismo en animales que en árboles, con la evaluación final de la cantidad de agua que necesitan estos últimos según la zona donde crecen. Muy ingeniosa, por fin, resulta la descripción de la difusión molecular.

En los seis primeros capítulos se introducen las ideas básicas de la mecánica de fluidos, completadas con pinceladas históricas de la fisiología de la circulación de la sangre. En los capítulos sucesivos trata del sistema venoso, de los distintos tipos de corazones que hay en la naturaleza, del transporte de oxígeno, del transporte de calor, de los vasos sanguíneos y de los sistemas de control.

El entusiasmo del lector por este libro sólo puede verse empañado por dos detalles: uso frecuente de las unidades de longitud y volumen típicas de los países anglosajones (en vez de las unidades del sistema internacional) y carencia de matemáticas. Creemos que alguna expresión formal, quizás en un apéndice, serviría para aclarar algún concepto o ley al lector habituado a la precisión y concreción del lenguaje matemático. (D. J.)



Victor F. Weisskopf

Ciencia básica, especie amenazada

La investigación básica, la que sólo busca conocer mejor la naturaleza y a nosotros mismos, se halla en peligro. No hay que andar muy lejos para convencerse. Instituciones públicas establecidas para apoyar la investigación básica dedican una proporción cada vez mayor de sus recursos a la ciencia aplicada. A la hora de solicitar la aprobación de un proyecto, los investigadores se sienten en la obligación de resaltar las implicaciones prácticas que se derivarán del mismo. Resulta sintomática a este propósito la postura de Barbara Mikulski, senadora por Maryland y presidenta del Comité del Senado sobre Investigación y Desarrollo; en su opinión cuestiones importantes para el país serían el cambio climático, el despegue industrial o la computación de altas prestaciones.

Quizá fuese de esperar semejante cambio en la valoración de los temas. A lo largo de este siglo, la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica han orientado a los investigadores hacia una serie de brillantes descubrimientos básicos. La ciencia, la física al menos, se ha encaramado en la cima de un depurado conocimiento. A partir tanto de la física como de la biología se configuran constantemente técnicas innovadoras. Pero contemporáneamente comenzamos a echar en falta las grandes intuiciones de antaño. A esa traslación de intereses han contribuido también factores sociales y económicos: en cuanto comenzaron las inquietudes por la competitividad económica y por el ambiente, las administraciones públicas acudieron a la ciencia en demanda de soluciones.

La tendencia a apoyar a la investigación aplicada se ha convertido en amenaza contra aquellos sectores de la ciencia básica sin connotaciones prácticas obvias. La astronomía, la cosmología, la física de partículas y parte de la física nuclear son buenos ejemplos de esas áreas, puesto que versan sobre fenómenos que distan mucho de nosotros en tiempo y en espacio. La formación de los elementos en las estrellas, la gran explosión original y lo que ocurrió en los tres primeros minutos, el descubrimiento de los quarks, los mesones y los electrones pesados de corta vida o las reacciones nucleares altamente energéticas nos dicen mucho sobre la estructura íntima de la materia y sobre el origen y el futuro de nuestro universo, pero guardan escasa relación con los procesos desarrollados en nuestro entorno. Las llamaré aquí "ciencias cósmicas".

Y las contrapondré a las "ciencias terrestres", entendiendo por tales las que abordan la materia que hay en nuestro planeta: la física atómica, la física de la materia condensada, la parte de la física nuclear que se ocupa de los reactores y de la radiactividad, así como la química, la biología y la geología. En tal dominio no entran en juego los quarks ni otras partículas elementales. Dentro de estos campos las aplicaciones son cosa obvia y fácil de predecir.

La física se divide, pues, en dos secciones: la "no aplicable" y la "aplicable". Las ciencias cósmicas pertenecen a la primera categoría, aunque esto nunca se puede decir definitivamente.

De la sección "no aplicable" se han obtenido ya algunos productos excelentes; por ejemplo, los detectores ultrasensibles de alta definición desarrollados en física de partículas han resultado utilísimos en medicina, biología y estudios ambientales. La investigación básica ha demostrado ser también el mejor campo de entrenamiento para los futuros especialistas en ciencias aplicadas.

Pero tales consideraciones son precisamente el peor argumento en pro de una investigación científica que aspire, ante todo, a saber y entender. La ciencia se asocia a un árbol cuyas raíces son la investigación básica. Si se le cortan las raíces, el árbol degenera y muere. El filósofo Michael Polanyi decía que "[la ciencia básica] tenía justamente por misión elucidar la naturaleza de las cosas bajo condiciones controladas con mayor cuidado y según criterios más rigurosos que los que suelen darse en las situaciones creadas por los problemas prácticos... Tal sensibilidad no puede ser suscitada a voluntad para propósitos ajenos a su propia pasión."

La ciencia básica, lo mismo cósmica que terrestre, crea importantes valores educativos, éticos y políticos. Fomenta un espíritu crítico, antidogmático, un estar dispuesto a decir cuando haga falta "Me había equivocado", y una inclinación idealista a dedicarse a trabajos interesantes aunque sean poco lucrativos. La ciencia básica establece un vínculo entre los humanos y la naturaleza, y no reconoce fronteras industriales, nacionales, raciales ni ideológicas.

No podemos contar ya con la generosísima financiación de que disfrutó la investigación básica en otras épocas. Pero el apoyo que se le preste no debe reducirse tanto que importantes campos de esa investigación desaparezcan antes de que puedan cultivarlos las generaciones jóvenes. Podría ocurrir así con la física de partículas. Cancelado el proyecto norteamericano del Supercolisionador Superconductor, está también en suspenso la construcción de un colisionador más pequeño en Europa por falta de fondos (y quizá por no hacérsele ya competencia al otro lado del Atlántico). El carpetazo a esos proyectos, o su retraso excesivo, puede determinar que los jóvenes no lleguen a profundizar en dicho dominio, con el riesgo consiguiente para la investigación en la estructura fundamental de la materia. Sólo la colaboración internacional, menospreciada en el pasado, podrá tal vez salvar del colapso a una investigación del máximo interés. El declinar de este tipo de trabajos no sería nada bueno para la ciencia, a pesar de lo limitado de su aplicabilidad práctica.

En el presupuesto para 1995 Bill Clinton propone gastar en investigación y desarrollo una proporción del producto nacional bruto menor que la que se ha venido gastando anualmente desde 1958, según el Comité Parlamentario para Ciencia, Espacio y Tecnología. Semejante tendencia no augura nada bueno para el futuro. Esos recortes se producen también en algunos países del viejo comntinente.

Polanyi estaba en lo cierto: la ciencia no puede florecer si no se la cultiva buscando el conocimiento por el conocimiento. Pero este tipo de investigaciones no puede ser encendido y apagado como una luz eléctrica. Por otra parte, los humanos no sobreviviremos como especie a no ser que la ciencia se aplique con intensidad y sabiduría a la mejora de nuestra condición. La existencia del hombre depende de la compasión y del saber. Los conocimientos sin compasión son inhumanos; la compasión sin conocimientos es ineficaz.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



DETERMINACION BIOLOGICA DE LA HOMOSEXUALIDAD MASCULINA, por Simon LeVay y Dean H. Hamer
Cierta estructura cerebral y una condición genética apuntan hacia un componente biológico de la homosexualidad masculina.

¿UNA DETERMINACION BIOLOGICA?, por William Byne
Los rasgos genéticos y neuroanatómicos vinculados con la orientación sexual no prueban que se dé una relación causal.

BOHM Y LA MECANICA CUANTICA, por David Z. Albert
La propuesta alternativa de Bohm, ignorada por casi todos durante cuarenta años, pone en un brete la concepción probabilista y subjetivista de la realidad implícita en la formulación corriente de la mecánica cuántica.

DESARROLLO DE LA CORTEZA CEREBRAL, por Rafael Yuste
Los dominios neuronales unen entre sí células nerviosas. Tales uniones de hendidura desaparecen durante el desarrollo, reemplazadas en su función por conexiones sinápticas.

LAS VISIONES ASTRONOMICAS DE CHESLEY BONESTELL, por Ron Miller
La excepcional combinación de conocimientos técnicos y expresividad gráfica de este artista infundió vida en la astronomía y facilitó el avance del programa de vuelos espaciales tripulados.

PERFORACION DIRECCIONAL, por George A. Cooper
Mediante nuevas técnicas de perforación se salvan obstáculos naturales y artificiales para extraer gas o petróleo, detectar contaminación en el subsuelo o instalar conducciones subterráneas.

ASI SE ENFRENTAN LOS INTERFERONES CON LA ENFERMEDAD, por Howard M. Johnson, Fuller W. Bazer, Brian E. Szente y Michael A. Jarpe
Aunque no han resultado ser la panacea como se esperaba de ellos, los interferones proporcionan una terapia para enfermedades infecciosas y oncológicas

LA LUNA Y EL ORIGEN DEL HOMBRE, por Jacques Laskar
Si la Luna no existiera, la orientación del eje de la Tierra no sería estable y experimentaría grandes variaciones caóticas en el curso de los tiempos. Los cambios climáticos resultantes de estas variaciones habrían perturbado el desarrollo de la vida.

